



UNIVERSITÀ DI PISA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA, DEI SISTEMI,  
DEL TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI**

**RELAZIONE PER IL CONSEGUIMENTO DELLA  
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE**

***Sviluppo e Applicazione di uno Strumento Software per la  
Comparazione di Tecnologie Alternative di Taglio***

---

RELATORE

IL CANDIDATO

Prof. Ing. Gino Dini

Michela Dalle Mura

*Dipartimento di Ingegneria  
Civile e Industriale*

michela\_dm\_89@hotmail.it

Sessione di Laurea del 22/07/2014  
Anno Accademico 2013/2014  
Consultazione consentita



*“ Goditi l'amore delle persone che  
ti vogliono bene, condividilo con  
loro e dedicagli il tuo.”*

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione del mio percorso di Tesi.

Vorrei innanzitutto esprimere la mia sincera gratitudine al Prof. Dini, non solo per i preziosi insegnamenti che ho ricevuto durante i due anni di laurea magistrale, ma anche per le numerose ore dedicate alla mia tesi, per il sostegno e l'attenzione che mi ha offerto durante tutto questo cammino, per la costanza e l'impegno che ha messo lui per primo per la riuscita di questo lavoro che, spero, lo renda soddisfatto del mio operato.

Ringrazio poi con affetto tutta la mia famiglia. Un sentito grazie va a Mamma e Papà, senza i quali non sarei mai arrivata dove sono. Ringrazio i miei genitori non solo per il sostegno di tutti questi anni, ma anche e soprattutto per la loro capacità di spronarmi, di consigliarmi e di insegnarmi che con impegno, serietà e buona volontà è possibile arrivare ovunque; spero di renderli soddisfatti della persona che sono diventata. Come non ringraziare poi i miei due fratelli, Dennis e Alessandro; non che mi abbiano aiutato nel mio lavoro di tesi, ma mi hanno sicuramente aiutato a crescere tra risate e spensieratezza, a scherzare con me e di me facendomi divertire e, cosa più importante, a prendere la vita con un sorriso. Una riga d'amore voglio dedicarla anche alla mia piccola Minnie, ci coccoleremo sempre.

Un grazie particolare va ad una persona molto speciale, un punto di riferimento per la mia esistenza, una persona paziente e gentile, che sa supportarmi ma soprattutto sopportarmi, e capisco che non sia facile. Una persona sempre presente, che sa ascoltarmi soprattutto nei momenti di panico, che mi ha sempre fatto credere in me e nelle mie capacità, che non pretende di insegnarmi a vivere ma che mi ispira a dare sempre il meglio di me. Grazie a Luca, la luce del mio passato, presente e futuro.

Un pensiero va poi ad amiche ed amici, a chiunque mi abbia sostenuto in questi anni di duro lavoro, a chiunque mi abbia regalato sorrisi e momenti felici, a chiunque mi abbia consigliato e motivato; sicuramente tra tutti questi va a Giulia un grazie speciale. Ringrazio tutti quelli che mi hanno aiutato ad arrivare dove sono, quindi anche Professori e compagni di università e tutti coloro che in qualche modo hanno contribuito alla riuscita dei miei obiettivi.

Spero di avervi resi tutti fieri di me, non tanto per quello che si festeggia con questa tesi, quanto per la persona che sono. Sappiate che se sono così è grazie a tutti voi...o per colpa vostra!

## **Sommario**

Questo lavoro di tesi nasce da un approfondito studio dei molteplici processi tecnologici di taglio di lamiere metalliche utilizzati dalla moderna industria meccanica.

In un mercato dinamico, globale e competitivo, quale quello odierno, le sfide da superare ed i rischi che si possono incontrare nel soddisfare contemporaneamente le esigenze dei clienti e gli obiettivi di profitto sono diversi. Risulta perciò necessario poter confrontare, sotto un profilo sia economico che qualitativo, le diverse soluzioni tecnologiche, al fine di scegliere consapevolmente quale adoperare, in relazione agli obiettivi preposti.

Lo scopo del presente lavoro è quello di sviluppare uno strumento di calcolo capace di comparare tecnologie di taglio alternative dal punto di vista della convenienza economica, non potendo comunque una scelta definitiva prescindere da considerazioni sulla qualità di taglio ottenibile. In particolare, ne sono state selezionate quattro per il presente elaborato, di cui una convenzionale, il taglio per fresatura, e tre non convenzionali, ovvero il taglio con idroabrasivo, il taglio per elettroerosione a filo ed il taglio con fascio laser. Il modello sviluppato potrà quindi essere un utile e valido strumento per aiutare le organizzazioni a raggiungere l'efficacia della produzione ed allo stesso tempo il successo economico.

## **Abstract**

This thesis work comes from an in-depth study of the various technological processes of metal sheet cutting used by modern industry.

In a dynamic, global and competitive environment as it is today, there are several challenges and risks in meeting and satisfying customers' requirements and profit goals. Therefore it is necessary to compare the different technological solutions, under both economical and qualitative aspects, in order to consciously choose which one to use, accordingly to the prefixed goals.

The purpose of the present work is to develop a calculation tool, able to compare different cutting methods from the economic point of view; however, the definitive choice cannot leave obtainable cutting quality out of consideration. In particular, four technologies have been selected for the present study: one conventional, milling cutting, and three non-conventional, that are abrasive water jet cutting, wire electrical discharge machining and laser beam machining. Therefore, the present model could be used as a valid and useful tool for helping organizations in achieving at the same time production effectiveness and economic success.

# Sommario

---

1 INTRODUZIONE.....	10
1.1 Contesto generale e motivazione.....	10
1.2 Obiettivo .....	12
1.3 Selezione delle tecnologie di taglio da analizzare .....	12
1.4 Metodologia impiegata e struttura delle attività svolta .....	13
2 STATO DELL' ARTE.....	15
2.1 Tecnologia AWJ-Modelli esistenti per il calcolo del costo totale.....	16
2.1.1 Principio fisico di taglio del materiale.....	16
2.1.2 Parametri di processo e loro influenza sulle prestazioni di taglio.....	19
2.1.3 Modello di produttività del processo.....	23
2.1.4 Consumo dei materiali.....	24
2.1.5 Consumo energetico.....	26
2.1.6 Considerazioni sulla qualità del taglio.....	28
2.1.7 Modelli esistenti per il calcolo del costo totale.....	29
2.2 Tecnologia WEDM- Modelli esistenti per il calcolo del costo totale.....	31
2.2.1 Principio fisico di taglio del materiale.....	31
2.2.2 Parametri di processo e loro influenza sulle prestazioni di taglio.....	32
2.2.3 Modello di produttività del processo.....	35
2.2.4 Consumo dei materiali.....	36
2.2.5 Consumo energetico.....	37
2.2.6 Considerazioni sulla qualità del taglio.....	38
2.2.7 Modelli esistenti per il calcolo del costo totale.....	40
2.3 Tecnologia per fresatura- Modelli esistenti per il calcolo del costo totale.....	41
2.3.1 Principio fisico di taglio del materiale.....	42
2.3.2 Parametri di processo e loro influenza sulle prestazioni di taglio.....	43

2.3.3 Modello di produttività del processo.....	46
2.3.4 Consumo dei materiali.....	47
2.3.5 Consumo energetico.....	49
2.3.6 Considerazioni sulla qualità del taglio.....	50
2.3.7 Modelli esistenti per il calcolo del costo totale.....	52
2.4 Tecnologia LASER- Modelli esistenti per il calcolo del costo totale.....	52
2.4.1 Principio fisico di taglio del materiale.....	53
2.4.2 Parametri di processo e loro influenza sulle prestazioni di taglio.....	56
2.4.3 Modello di produttività del processo.....	58
2.4.4 Consumo dei materiali.....	59
2.4.5 Consumo energetico.....	60
2.4.6 Considerazioni sulla qualità del taglio.....	61
2.4.7 Modelli esistenti per il calcolo del costo totale.....	64
2.5 Limiti degli attuali modelli di costo. ....	65
3 DEFINIZIONE DEI MODELLI DI COSTO .....	67
3.1 Descrizione generale del modello di costo .....	67
3.1.1 Raccolta Dati.....	68
3.2 Tecnologia AWJ.....	73
3.2.1 Costo del sistema di intensificazione della pressione.....	73
3.2.2 Costo della macchina.....	76
3.2.3 Costo della manodopera.....	76
3.2.4 Costo dell'energia consumata.....	76
3.2.5 Costo dell'ugello.....	77
3.2.6 Costo dell'abrasivo.....	77
3.2.7 Costo dell'acqua.....	78
3.2.8 Spese generali.....	78
3.2.9 Impostazione finale del modello.....	79
3.2.10 Raccolta dati.....	79

3.3 Tecnologia WEDM.....	81
3.3.1 Costo del generatore di tensione.....	81
3.3.2 Costo della macchina.....	82
3.3.3 Costo della manodopera.....	83
3.3.4 Costo dell'energia consumata.....	83
3.3.5 Costo del filo.....	83
3.3.6 Spese generali.....	84
3.3.7 Impostazione finale del modello.....	84
3.3.8 Raccolta dati.....	85
3.4 Tecnologia per fresatura.....	86
3.4.1 Costo della fresatrice.....	86
3.4.2 Costo della manodopera.....	87
3.4.3 Costo dell'energia consumata.....	87
3.4.4 Costo dell'utensile.....	88
3.4.5 Spese generali.....	89
3.4.6 Impostazione finale del modello.....	89
3.4.7 Raccolta dati.....	89
3.5 Tecnologia LASER.....	90
3.5.1 Costo della sorgente laser.....	90
3.5.2 Costo della macchina.....	91
3.5.3 Costo della manodopera.....	91
3.5.4 Costo dell'energia consumata.....	92
3.5.5 Costo del gas di assistenza.....	92
3.5.6 Spese generali.....	93
3.5.7 Impostazione finale del modello.....	93
3.5.8 Raccolta dati.....	93
4 IMPLEMENTAZIONE DELLO STRUMENTO DI CALCOLO .....	94
4.1 Specifiche di progetto.....	94



4.2 Descrizione dello strumento.....	95
4.2.1 Inizializzazione.....	95
4.2.2 Calcoli da automatizzare.....	99
4.2.3 Risultati da ottenere.....	101
4.3 Sviluppo dello strumento.....	102
4.3.1 Interfaccia grafica.....	102
4.3.2 Funzioni ed algoritmi.....	107
5 CASO DI STUDIO.....	114
5.1 Descrizione del caso di studio.....	114
5.1.1 Caratteristiche del componente.....	115
5.1.2 Caratteristiche del taglio.....	115
5.1.3 I dati iniziali del problema.....	115
5.2 L'utilizzo dello strumento di calcolo.....	120
5.2.1 Il foglio "Dati".....	121
5.2.2 Il foglio "AWJC".....	123
5.2.3 Il foglio "WEDM".....	127
5.2.4 Il foglio "MILLING".....	129
5.2.5 Il foglio "LBM".....	131
5.3 Analisi di sensitività.....	134
5.3.1 Il foglio "AWJC".....	136
5.3.2 Il foglio "WEDM".....	138
5.3.3 Il foglio "MILLING".....	140
5.3.4 Il foglio "LBM".....	142
5.3.4 Il foglio "Grafici".....	143
6 CONCLUSIONI.....	146
Bibliografia.....	149

# 1. Introduzione

---

## 1.1 CONTESTO GENERALE E MOTIVAZIONE

In un mercato dinamico, globale e competitivo, quale quello odierno, le sfide da superare ed i rischi che si possono incontrare nel soddisfare contemporaneamente le esigenze dei clienti e gli obiettivi di profitto sono diversi.

Esistono a tal scopo molteplici processi tecnologici usati dalla moderna industria meccanica e continua è la loro evoluzione sotto la spinta della competitività richiesta nell'attuale mercato globale.

Accanto infatti alle soluzioni tecnologiche convenzionali, che risultano essere ancor oggi le più diffuse, troviamo le non convenzionali, o innovative, quali il taglio laser, il taglio al plasma, il taglio con getto d'acqua ed il taglio per elettroerosione, affermatesi industrialmente quando, dopo una prima fase di ricerca, hanno trovato una specifica applicazione di riferimento che ne ha consentito lo sviluppo in maniera economica.

I processi di asportazione di truciolo convenzionali, quali la segatura, la fustellatura, la trancitura, le cese, il taglio ossiacetilenico e la fresatura, possono talvolta non essere in grado di operare in modo corretto e affidabile, lasciando spazio a tecnologie di lavorazione che utilizzano meccanismi di rimozione del materiale e forme di energia differenti, come taglio laser, taglio idroabrasivo o taglio per elettroerosione.

Poiché varie sono le tecnologie di taglio per la fabbricazione di componenti, risulta necessario poterle confrontare sia sotto il profilo economico che qualitativo, al fine di scegliere così consapevolmente quale adoperare, in relazione agli obiettivi preposti.

Il presente lavoro si concentra in particolare sulle tecnologie di taglio di lamiere metalliche, data la loro importanza e diffusione in svariati campi industriali. Molti sono infatti i prodotti realizzabili tramite il taglio di fogli metallici, dai microcomponenti (Figure 1.1-1.2) agli arredi da esterni (Figure 1.3-1.4); svariati sono poi i profili e le contornature che possono essere effettuate su lamiera, grazie alle moderne tecnologie di taglio (Figura 1.5).



Figure 1.1-1.2: Componenti ottenuti dal taglio di lamiere metalliche



Figure 1.3-1.4: Arredamenti da esterni ottenuti dal taglio di lamiere metalliche

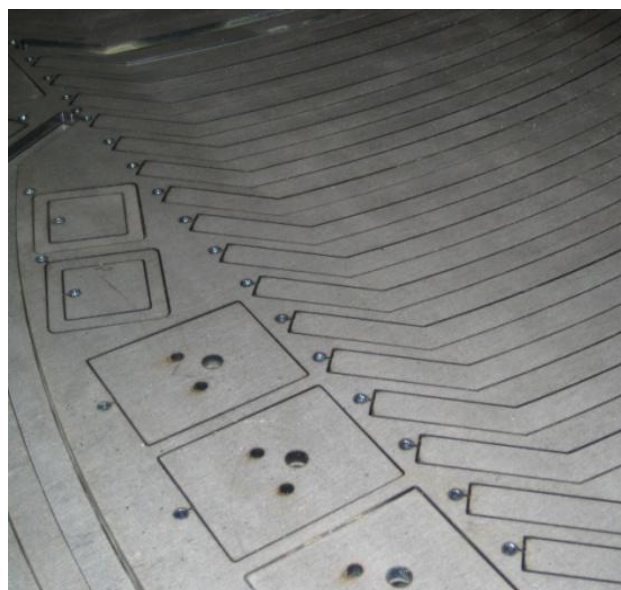


Figura 1.5: Profili di taglio realizzabili su lamiera

## 1.2 OBIETTIVO

Lo scopo del presente lavoro è quello di sviluppare un primo tentativo di strumento di calcolo capace di comparare dal punto di vista della convenienza economica tecnologie di taglio alternative, non potendo in ogni caso una scelta definitiva prescindere da considerazioni sulla qualità di taglio ottenibile.

Esso dovrà in particolare:

- Essere inizializzato, ovvero contenere tutto ciò che deve essere inserito manualmente dall'operatore, a livello di dati di input del problema da analizzare;
- Automatizzare i calcoli, includendo tutte le operazioni che lo strumento dovrà svolgere in automatico, operazioni che non necessariamente dovranno essere mostrate all'operatore;
- Visualizzare i risultati, comprendendo un insieme di dati, grafici, tabelle che racchiuderanno gli elementi riassuntivi del problema preso in esame e che dovranno manifestarsi automaticamente all'operatore, restituendo la soluzione economicamente più vantaggiosa grazie al confronto di diverse tecnologie di taglio.

Il modello sviluppato potrà quindi essere un utile e valido strumento per aiutare le organizzazioni a raggiungere l'efficacia della produzione ed allo stesso tempo il successo economico.

## 1.3 SELEZIONE DELLE TECNOLOGIE DI TAGLIO DA ANALIZZARE

In questo elaborato è stato in particolare trattato il taglio di una lamiera metallica per mezzo di quattro diverse tecnologie, di cui una convenzionale, ovvero il taglio per fresatura (in seguito indicato anche con il termine inglese *Milling*), e tre non convenzionali, in particolare il taglio con idroabrasivo (in seguito indicato anche con l'acronimo AWJC = *Abrasive Water Jet Cutting*), il taglio per elettroerosione a filo (successivamente denotato anche con la sigla WEDM = *Wire Electrical Discharge Machining*) ed il taglio laser (identificato poi tramite l'acronimo inglese LBM = *Laser Beam Machining*). Questo perché si è ritenuto opportuno porre a confronto tecniche convenzionali con tecniche non convenzionali, escludendo però tutte quelle che non fossero paragonabili alle suddette in termini sia di geometria del taglio che di processo. Tra gli esistenti, i processi scelti sono in grado di eseguire contornature e profili complessi, mentre si escludono tagli come la segatura, con la quale si ottengono geometrie differenti, la tranciatura, che prevede un processo completamente diverso ma anche il taglio plasma ed il taglio ossiacetilenico, con i quali si ottengono qualità non paragonabili ai precedenti.

## **1.4      METODOLOGIA IMPIEGATA E STRUTTURA DELLE ATTIVITA' SVOLTE**

Per raggiungere gli scopi proposti si è ritenuto importante stabilire una procedura formalizzata, destinata a garantire il rispetto di tutti i passi necessari all'ottenimento dei risultati attesi.

Il metodo proposto consiste di 5 fasi illustrate in figura 1.6 e di seguito descritte:

1. Nella prima parte viene presentata una descrizione dettagliata dello stato dell'arte relativo agli approcci già esistenti per il calcolo dei costi totali di ciascuna lavorazione, preceduto da un approfondimento, per ogni tipologia, del principio fisico di taglio, del consumo sia energetico che di materiali e da considerazioni sulla qualità ottenibile, intesa come finitura superficiale, forma del taglio e alterazioni delle caratteristiche del materiale (capitolo 2).
2. Nella seconda fase, delineato l'attuale livello della scienza e della tecnologia relativamente alla materia oggetto di studio, si sviluppa la formulazione matematica del problema integrando, rispetto alle loro mancanze, i modelli di costo trovati in letteratura ed eliminandone eventuali difetti per giungere così ad un'impostazione finale (capitolo 3).
3. Il terzo passo consiste nell'implementazione software dello strumento di calcolo attraverso lo sviluppo di funzioni ed algoritmi che ne permettano il funzionamento (capitolo 4).
4. La penultima fase, concentrata su un caso di studio, ha come obiettivo la dimostrazione dell'efficacia concettuale e dell'efficienza algoritmica del software implementato, motivo per cui viene presentata un'analisi di sensitività di diversi parametri ritenuti fondamentali (capitolo 5).
5. Infine vengono illustrate nell'ultima parte le conclusioni del lavoro e valutate prospettive per il futuro e possibili ulteriori miglioramenti (capitolo 6).

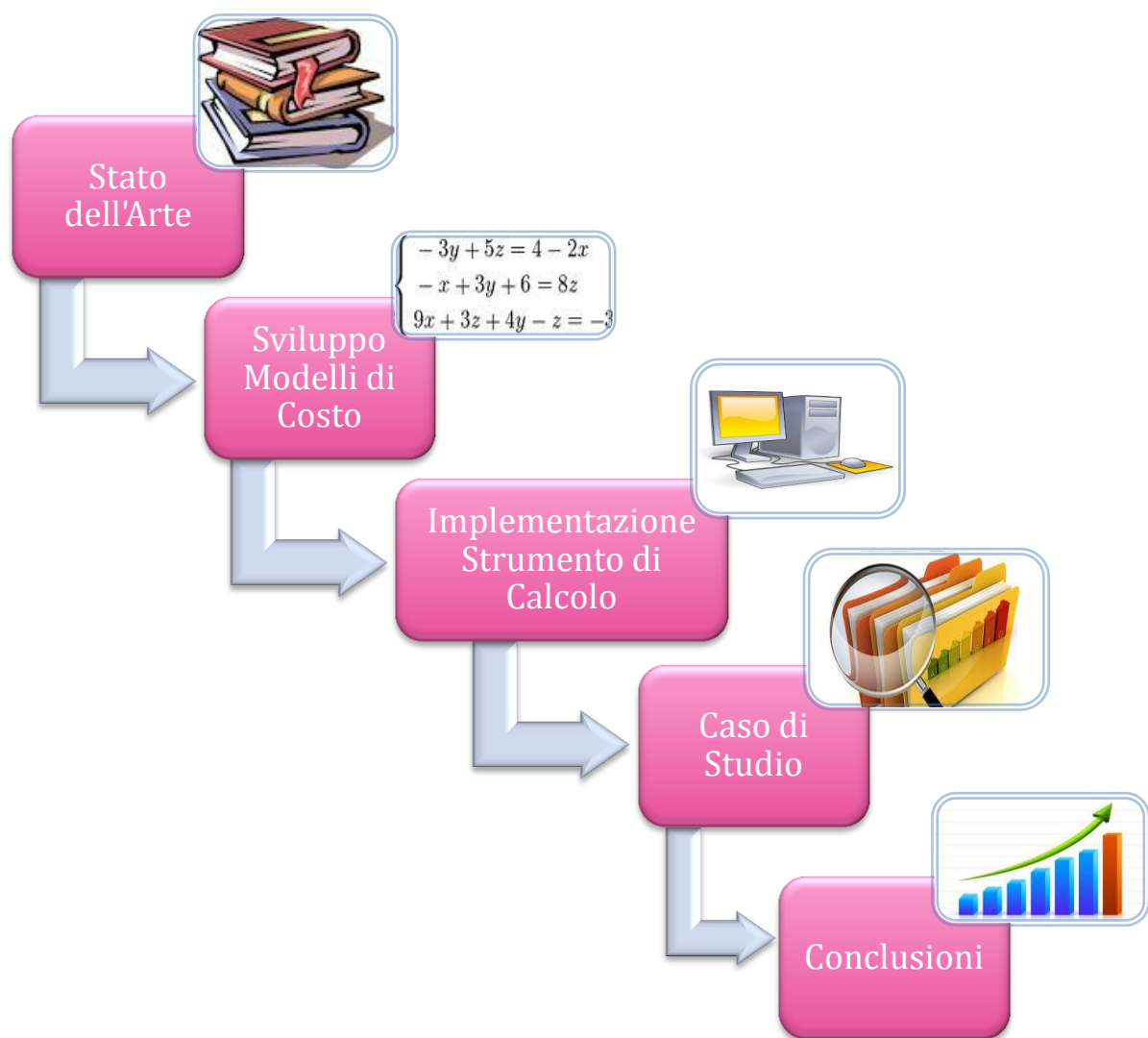


Figura 1.6 : Approccio Metodologico



## 2. Stato dell' Arte

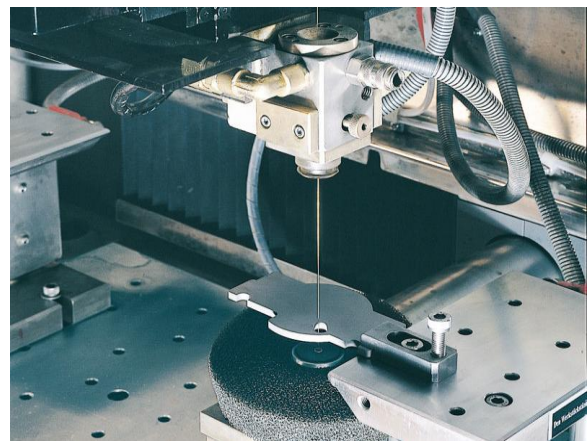
---

Il processo di taglio è un processo per asportazione di materiale nel quale un utensile multi-tagliente a geometria definita come una fresa in caso di fresatura, oppure un filo metallico nel caso dell' elettroerosione o ancora un fascio di luce per la lavorazione laser, altrimenti un getto d'acqua per il taglio idroabrasivo, rimuove una porzione di materiale, trasformandolo in residuo di lavorazione e generando una superficie con le caratteristiche di precisione e rugosità specificate sul disegno del pezzo. L' output del processo è quindi una superficie, mentre il truciolo è lo scarto di lavorazione. Il processo avviene grazie al moto fornito da una macchina e a diverse forme di energia generate da altrettanti dispositivi.

L'obiettivo del taglio di una superficie è, quindi, quello di realizzare un determinato profilo che può essere interno o esterno e svilupparsi sia nel piano che nello spazio (figura 2.1). Questo taglio deve essere fatto rispettando i due aspetti di economicità e qualità.



a



b



c



d

Figura 2.1: Esempi di taglio AWJC (a) –WEDM (b) –MILLING (c) –LBM (d)

Lo scopo di questo capitolo è quindi quello di delineare gli approcci esistenti nel dimensionamento dei costi legati all' utilizzo di varie tecnologie di taglio; al fine infatti di soddisfare tutti i requisiti di economicità e qualità è indispensabile valutare ogni componente di costo incidente nelle varie lavorazioni.

Per questo motivo nei paragrafi successivi sarà illustrata una panoramica delle quattro tecnologie di taglio selezionate, seguita da un'analisi dei metodi esistenti relativi alla valutazione economica.

## 2.1 TECNOLOGIA ABRASIVE WATER JET

Per le caratteristiche di processo la tecnologia del getto d'acqua rientra nella categoria delle lavorazioni non convenzionali di tipo meccanico: gli elementi che la caratterizzano, ovvero acqua e abrasivo, hanno una notevole disponibilità in natura a garanzia di facile reperibilità e ridotto impatto ambientale. La tecnologia water jet utilizza per le lavorazioni l'energia posseduta dal getto d'acqua in pressione e, nella variante qui presentata, ovvero *abrasive water jet*, prevede l'aggiunta di particelle di materiale abrasivo.

La competitività della tecnologia AWJ è dovuta principalmente alla possibilità di eseguire un taglio a freddo: l'acqua non solo funge da vettore per l'energia, ma anche da liquido refrigerante che impedisce le alterazioni strutturali nei materiali metallici. Il taglio infatti non lascia sfridi e bave evidenti e non esiste un vero contatto utensile-pezzo; inoltre, sebbene gli sforzi agenti sul pezzo siano tali da produrre l'asportazione di materiale, le forze in lavorazione sono esigue e ciò rende lo staffaggio meno critico rispetto ad altre tecnologie tradizionali. Gli impianti sono dotati di un sistema a controllo numerico che garantisce una gestione automatica delle funzioni operative, con elevata affidabilità e precisione di lavorazione.

### 2.1.1 PRINCIPIO FISICO DI TAGLIO DEL MATERIALE

Il processo su cui si basa la tecnologia del getto d'acqua consiste nella conversione dell'energia di pressione posseduta dall'acqua in energia cinetica: il fluido agisce così sul pezzo come utensile, producendo il tipo di lavorazione desiderata. Questa tecnologia riesce ad esprimere il massimo della sua potenzialità nella variante AWJ che prevede la miscelazione di particelle abrasive al getto d'acqua, in modo da esaltarne le capacità di asportazione del materiale; i principali abrasivi utilizzati sono polveri di: ossido di alluminio, carburo di silicio, silice, granato.



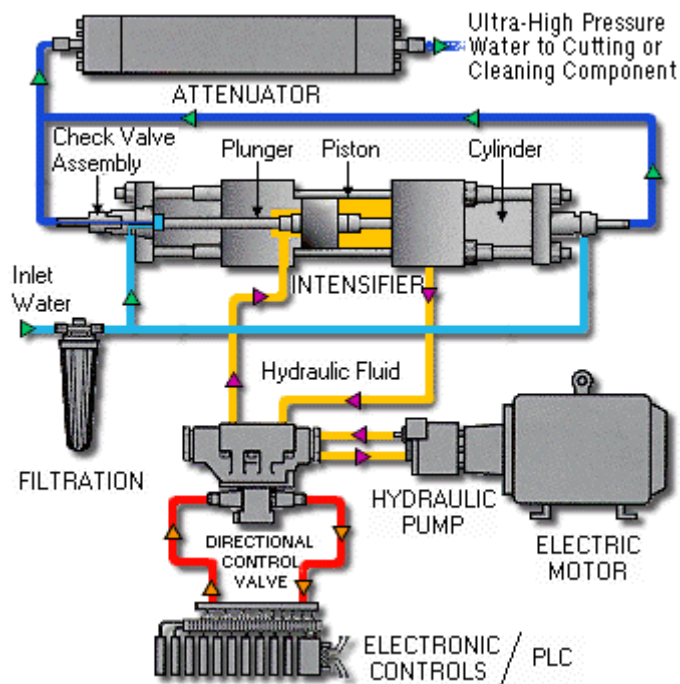


Figura 2.2: Impianto per il taglio AWJ

Il processo tecnologico, come rappresentato in figura 2.2, consiste nel prelevare acqua dalla rete idrica e, dopo averla depurata nell'impianto di trattamento, convogliarla al sistema di pompaggio; attraverso, infatti, un intensificatore di pressione, che può consentire il raggiungimento di livelli di pressione di 400 MPa e oltre, le piccole porzioni di acqua filtrata vengono portate ai livelli di pressione desiderati. L'acqua viene poi inviata alla testa di taglio dove avviene il passaggio da energia di pressione a energia cinetica attraverso l'utilizzo di un ugello primario o orifizio. A valle dello stesso è situata una camera di miscelazione in cui l'acqua in arrivo crea depressione che impone all'aria di sospingere l'abrasivo (effetto Venturi); l'abrasivo viene così miscelato al getto puro per iniziare lo scambio di quantità di moto tra le particelle solide e l'acqua, facendo acquisire alle particelle stesse l'energia necessaria per eseguire il taglio. L'acqua uscendo a velocità elevata, pari circa a 2 volte la velocità del suono, tenderebbe a divergere, distribuendo la sua energia su una superficie maggiore. Per avere un'energia e quindi un getto più concentrato, l'acqua viene miscelata con una piccola quantità di polimero liquido come polietilene, che consente oltretutto di ridurre attriti, quindi perdite di carico in corrispondenza del passaggio attraverso l'ugello, oltre che mantenere il getto più coeso per una distanza maggiore dall'ugello. Per aumentare ulteriormente le capacità di taglio si utilizza un ugello focalizzatore di materiale con elevata resistenza all'usura che, grazie alle sue caratteristiche geometriche e dimensioni del foro ridotte, permette appunto di focalizzare l'abrasivo all'interno del getto d'acqua. Il fluido all'uscita dell'ugello sarà quindi caratterizzato da buona coerenza ed elevata energia cinetica (figura 2.3).

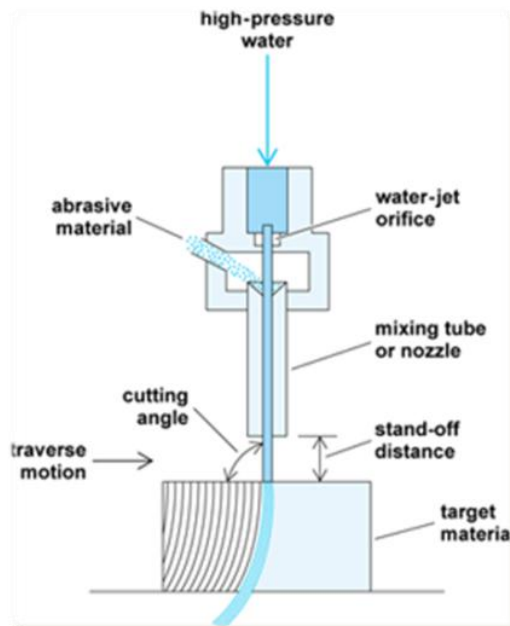


Figura 2.3: Schematizzazione del taglio idro-abrasivo

Quando il getto colpisce una superficie solida genera su questo una sollecitazione impulsiva, tipica di un urto, conseguenza della brusca variazione della quantità di moto che la massa d'acqua subisce. La forza così generata, trasmessa attraverso una superficie molto ridotta, dà quindi luogo ad una pressione sul materiale che può essere diverse volte superiore al valore della pressione dell'acqua a monte dell'ugello. L'energia cinetica è tale da tagliare per azione erosiva istantanea il materiale ed avvenuta l'asportazione, l'energia residua del getto viene dispersa nella vasca di raccolta.

Per materiali duttili, quali i metalli, esistono due possibili modalità di asportazione:

1. Abrasione: quando la particella di abrasivo giunge sulla superficie del pezzo con angolo di impatto ridotto e velocità superiore alla velocità critica relativa al materiale: il singolo grano di abrasivo funge da microutensile.
2. Erosione o asportazione plastica: quando l'angolo di impatto è elevato e il grano provoca un'elevata deformazione plastica del materiale.

Per piccole profondità di taglio, il getto possiede sufficiente energia da permettere ai grani di abrasivo di tagliare il materiale per asportazione di truciolo (zona di abrasione); per profondità più elevate il getto perde energia generando un taglio, non più per asportazione di truciolo ma per deformazione plastica del materiale (zona di deformazione); tra le due zone ne esiste una intermedia, detta zona di transizione, dove sussistono entrambi i fenomeni, com'è possibile notare in figura 2.4.

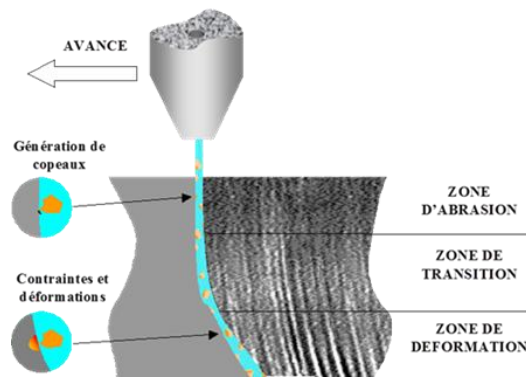


Figura 2.4: Taglio eseguito con getto d'acqua e polvere di abrasivo

### 2.1.2 PARAMETRI DI PROCESSO E LORO INFLUENZA SULLE PRESTAZIONI DI TAGLIO

L'insieme dei parametri che caratterizzano il processo AWJ può essere suddiviso in due categorie:

1. parametri idraulico-fluidodinamici, legati direttamente alle peculiarità del getto, tra cui:
  - pressione dell'acqua;
  - diametro dell'ugello primario;
  - lunghezza del focalizzatore;
2. parametri tecnologici, legati principalmente al processo, tra cui:
  - velocità di avanzamento della testa di taglio;
  - distanza tra l'ugello e il pezzo in lavorazione (*stand off distance*);
  - portata di abrasivo;
  - velocità delle particelle di abrasivo;
  - dimensione dei grani di abrasivo.

#### 2.1.2.1 PRESSIONE DELL'ACQUA

Rappresenta il parametro più importante, in quanto esiste un valore di soglia minimo di pressione sotto cui il pezzo non viene inciso. La pressione di alimentazione dell'acqua influisce su:

- Coefficiente di perdita di carico  $\mu$  (un aumento della pressione provoca una diminuzione di  $\mu$ , quindi le perdite aumentano);
- Velocità  $v$  di efflusso del getto (un aumento della pressione provoca un aumento di  $v$ );
- Forza  $F$  esercitata sul materiale (un aumento della pressione provoca un aumento di  $F$ );
- Portata  $Q$  e potenza della pompa  $P$  (un aumento della pressione provoca un aumento di  $Q$  e  $P$ );

- Energia specifica  $E_s$  (un aumento della pressione provoca un aumento di  $E_s$  e quindi un aumento della capacità di taglio) dove  $E_s$  è una misura dell'efficacia del taglio;
- Profondità di taglio eseguibile (cresce all'aumentare della pressione ma non oltre un certo limite, dopo cui il getto perde di efficacia a causa delle eccessive perdite di carico in corrispondenza dell'ugello, figura 2.5)

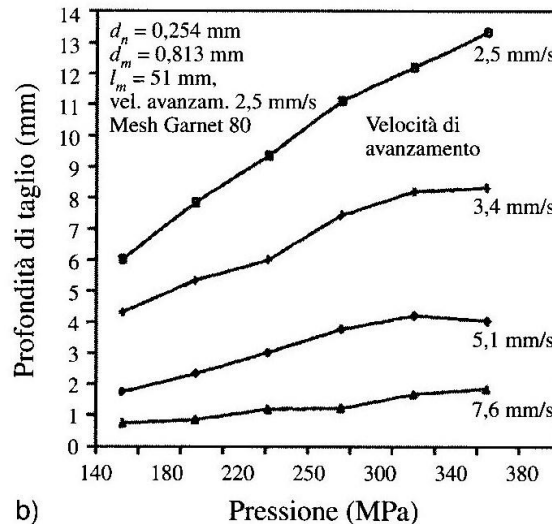


Figura 2.5: Effetto della pressione sulla profondità di taglio e sulla velocità di avanzamento [Monno, 2012]

### 2.1.2.2 DIAMETRO DELL'UGELLO PRIMARIO

Studi sperimentali [Monno, 2012] confermano che esiste una combinazione ottimale tra diametri di ugello primario e ugello focalizzatore per ottenere la massima profondità di taglio; in particolare il diametro del focalizzatore dovrebbe essere tre volte il diametro dell'ugello primario, parametro che influisce su:

- Forza  $F$  esercitata sul materiale (un aumento del diametro provoca un aumento di  $F$ );
- Portata  $Q$  e potenza della pompa  $P$  (un aumento del diametro provoca un aumento di  $Q$  e  $P$ );
- Energia specifica  $E_s$  (un aumento del diametro provoca un aumento di  $E_s$ );
- Energia posseduta dal getto (all'aumentare del diametro se ne ottiene una crescita con possibilità di tagliare spessori maggiori, sebbene un aumento eccessivo richieda una potenza eccessiva);
- Larghezza e qualità del taglio (all'aumentare del diametro il taglio risulta maggiormente craterizzato).

### 2.1.2.3 LUNGHEZZA DEL FOCALIZZATORE

La figura 2.6 mostra la relazione che intercorre tra la lunghezza del focalizzatore e il massimo spessore tagliabile. La profondità di taglio, inizialmente, aumenta linearmente con l'aumento della lunghezza del focalizzatore; ciò è dovuto al fatto che le particelle abrasive necessitano di una distanza critica per accelerare, superata la quale, a causa di perdite per attrito, la velocità delle particelle abrasive diminuisce, e diminuisce quindi anche lo spessore tagliabile. La lunghezza del focalizzatore dipende inoltre da vari parametri riguardanti l'abrasivo: abrasivi a granulometria maggiore necessitano di tubi più lunghi per una corretta miscelazione con l'acqua; con un aumento inoltre della portata di abrasivo si richiedono tubi più corti per raggiungere la velocità massima.

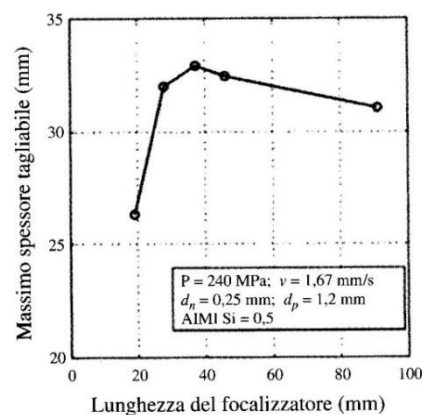


Figura 2.6: Massimo spessore tagliabile in funzione della lunghezza del focalizzatore [Monno, 2012]

### 2.1.2.4 VELOCITA' DI AVANZAMENTO DELLA TESTA DI TAGLIO

Maggiore è la velocità con cui il getto avanza lungo il percorso di taglio, minore sarà l'energia meccanica trasferita per unità di superficie sul materiale; ne consegue che un aumento della velocità di avanzamento influenza negativamente la profondità di taglio raggiungibile, provocando inoltre un peggioramento della qualità dei lembi tagliati. Tuttavia, l'utilizzo di un'elevata velocità di avanzamento dà luogo ad indubbi vantaggi in termini di produttività.

### 2.1.2.5 DISTANZA DI STAND OFF

Termine con cui si intende la distanza tra ugello e materiale da tagliare. Se troppo piccola, il getto non riesce a sviluppare una velocità sufficiente da consentire elevate pressioni di impatto sul materiale; se troppo grande, il getto subisce un'eccessiva divergenza riducendo così il suo contenuto energetico per unità di superficie. Esiste infatti una distanza ottimale.

### 2.1.2.6 PORTATA DI ABRASIVO

Aumentando la portata di abrasivo, aumenta la profondità del taglio, fino ad un massimo di portata di acqua pari a due volte quella di abrasivo. Se la portata di abrasivo risulta troppo bassa prevale l'azione erosiva dell'acqua con minori capacità di taglio; se troppo alta, l'abrasivo sottrae al getto troppa energia, necessaria a questo per portarsi alla stessa velocità dell'acqua, riducendo le prestazioni del processo. Esiste quindi un valore di portata ottimale tale da consentire la massima profondità del taglio, come si nota in figura 2.7.

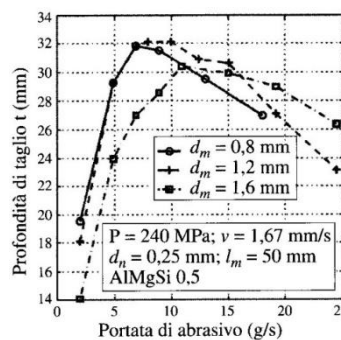


Figura 2.7: Massima profondità di taglio in funzione della portata di abrasivo [Monno, 2012]

### 2.1.2.7 VELOCITA' DELLE PARTICELLE DI ABRASIVO

La velocità posseduta dai grani di abrasivo diminuisce quanto più è alto il rapporto tra il diametro dell'ugello focalizzatore ed il diametro dell'ugello primario.

### 2.1.2.7 DIMENSIONE DEI GRANI DI ABRASIVO

Nel caso dei materiali duttili, quali i metalli, lo spessore tagliabile aumenta all'aumentare delle dimensioni delle particelle se il diametro rimane inferiore a 100  $\mu\text{m}$ ; al contrario, per diametri superiori, un aumento del diametro provoca una diminuzione del massimo spessore tagliabile, come visibile in figura 2.8 [Monno, 2012].

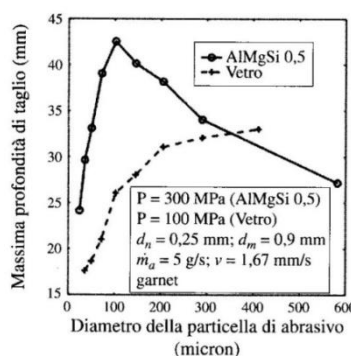


Figura 2.8: Profondità di taglio in funzione del diametro delle particelle di abrasivo

### 2.1.3 MODELLO DI PRODUTTIVITA' DEL PROCESSO

Il rateo di asportazione del materiale, indicato con l'acronimo inglese MRR (*Material Removal Rate*) indica il volume di materiale asportato nell'unità di tempo dal processo di taglio e può essere valutato come:

$$MRR = V_a a s \quad [m^3/s]$$

Dove  $V_a$  indica la velocità di avanzamento della testa di taglio,  $a$  indica l'ampiezza del solco di taglio mentre  $s$  lo spessore di taglio.

Nella lavorazione con getto d'acqua una possibile valutazione analitica del MRR [Chattopadhyay, 2009] è la seguente:

$$MRR = \eta \frac{Power}{Resistance} = \eta \frac{\frac{1}{2} (R m_w^\circ) \left( \frac{1}{1+R} \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \right)^2}{E_s} \quad [m^3/s]$$

Dove:

- $P$  = potenza [W]
- $R$  = mixing ratio =  $m_{ab}^\circ / m_w^\circ$
- $m_w^\circ$  = portata d'acqua [kg/s]
- $p$  = pressione dell'acqua [Pa]
- $\eta$  = coefficiente che tiene conto delle perdite di energia
- $\mu$  = coefficiente che tiene conto delle perdite di carico
- $\rho$  = densità dell'acqua [kg/m<sup>3</sup>]
- $E_s$  = energia specifica [J/m<sup>3</sup>], modellata usualmente nel caso dei metalli come  $E_s = \frac{E}{14}$   
dove  $E$  = modulo di Young del materiale [N/m<sup>2</sup>].

Il primo termine del numeratore ( $R m_w^\circ$ ) indica quindi la portata di abrasivo, mentre il secondo termine  $\left( \frac{1}{1+R} \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \right)$  indica la velocità del getto a valle dell'ugello.

Valori tipici del rateo di asportazione nel caso di taglio *abrasive water jet* sono di:

$$MRR \approx 10^4 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Com'è possibile notare da figura 2.9, l'andamento del volume di materiale rimosso in funzione del diametro del focalizzatore mostra che esiste un range in cui può essere massimizzato. Come già detto, studi dimostrano che esiste una combinazione ottimale tra diametro del focalizzatore e diametro dell'ugello primario (cioè rapporto pari a 3) che permette di ottenere massimo MRR e minima rugosità.

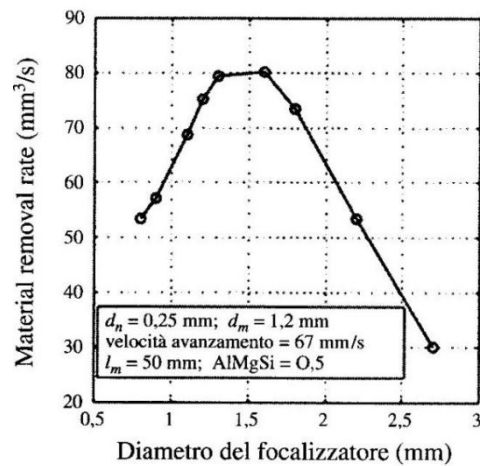


Figura 2.9: MRR in funzione del diametro del focalizzatore [Monno, 2012]

#### 2.1.4 CONSUMO MATERIALI

Ciò che si consuma principalmente durante la lavorazione AWJ sono l'ugello focalizzatore (figura 2.10) e l'abrasivo utilizzato.

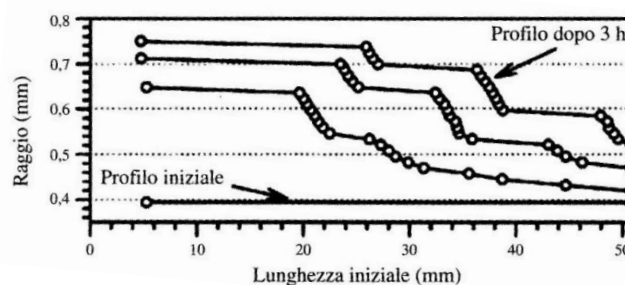


Figura 2.10: Profilo longitudinale dell'ugello focalizzatore dopo 3h di utilizzo [Monno, 2012]

Per ottenere infatti un taglio passante, nella camera di miscelazione le particelle di abrasivo sono unite al getto d'acqua ad alta velocità. La velocità raggiunta nell'ugello focalizzatore dipende da diversi fattori, raggiungendo valori come 500 m/s ed oltre. Le particelle che impattano sulle pareti dell'ugello ad alta velocità sono responsabili di una rapida usura dell'ugello stesso tramite asportazione di materiale dalle pareti. L'usura si manifesta quindi con la perdita di peso dell'ugello e con un aumento del diametro del focalizzatore. Il meccanismo di usura avviene in due modalità differenti: nella parte superiore, direttamente a contatto con la camera di miscelazione, le particelle colpiscono le pareti con angolo di impatto elevato, asportando quindi per erosione; al contrario, verso la parte terminale dell'ugello, dove la velocità delle fasi del getto è più uniforme sulla sezione, le particelle strisciano sulle pareti, avendo quindi basso angolo di impatto ed asportando così per abrasione. Sia i parametri del processo di taglio che la geometria dell'ugello sono legati al



processo di usura dell'ugello stesso; ecco dunque sintetizzati di seguito gli effetti di ciascuno di essi sul fenomeno di usura:

- lunghezza del focalizzatore (se aumenta diminuisce l'usura, figura 2.11)

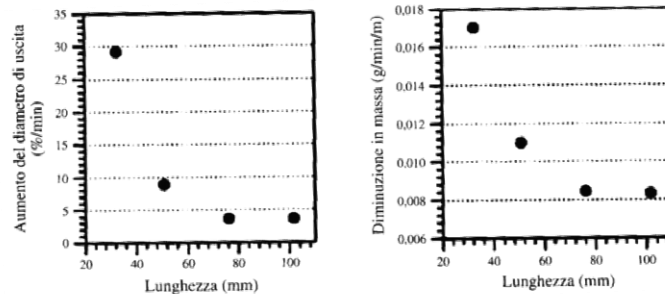


Figura 2.11: Effetto della lunghezza del focalizzatore sull'usura [Monno, 2012]

- portata di abrasivo (se aumenta cresce l'usura, figura 2.12)

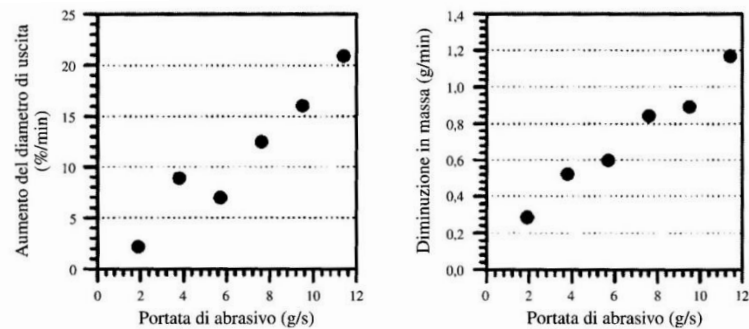


Figura 2.12: Effetto della portata di abrasivo sull'usura [Monno, 2012]

- pressione dell'acqua (se aumenta, cresce l'usura, figura 2.13)

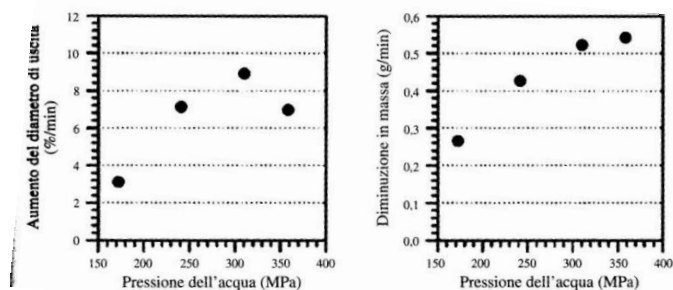


Figura 2.13: Effetto della pressione dell'acqua sull'usura [Monno, 2012]

Per quanto concerne il consumo di abrasivo, si deve sottolineare che esso viene in realtà riutilizzato un certo numero di volte (compreso tra le 2 e le 4) finché non perde le sue

capacità di asporto; un parametro fondamentale infatti nella scelta dell'impianto sarà proprio la capacità di recupero dell'abrasivo, intesa come capacità del sistema di asciugare l'abrasivo già utilizzato in precedenti operazioni di taglio. La relativa portata ottimale, al fine di ottenere le migliori prestazioni di taglio, intese come massimo spessore tagliabile, dipende da numerosi parametri tra cui:

- pressione del getto (se aumenta cresce la portata di abrasivo, figura 2.14a);
- portata d'acqua (se aumenta cresce la portata di abrasivo, figura 2.14b);
- diametro del focalizzatore (se si riduce si ha minor consumo di abrasivo, figura 2.14c);
- lunghezza del focalizzatore (se aumenta diminuisce la portata di abrasivo, figura 2.14d);
- numero di volte in cui viene riutilizzato, cioè 2-4 (ne diminuisce il consumo).

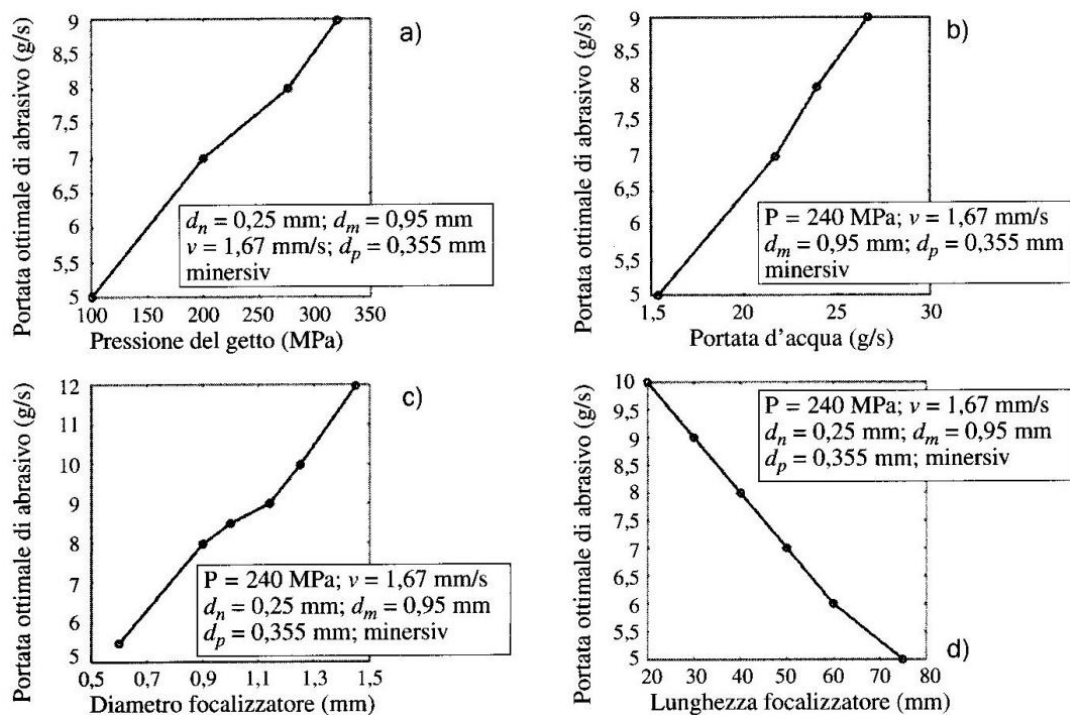


Figura 2.14 :Effetto di pressione (a), portata d'acqua (b), diametro (c) e lunghezza del focalizzatore (d) sulla portata ottimale di abrasivo [Monno, 2012]

### 2.1.5 CONSUMO ENERGETICO

Il consumo energetico durante una lavorazione water jet è dovuto in parte alla macchina ed ai suoi spostamenti, in parte alla pompa.

La parte di consumo dovuto alla macchina dipende dalle condizioni di lavoro della macchina stessa, sostanzialmente diverse in dipendenza sia della pianificazione produttiva sia dell'efficienza dell'apparecchiatura secondaria dello specifico stabilimento in cui la macchina è installata. In particolare, le operazioni che dovrebbero essere eseguite dalla e sulla macchina sono essenzialmente tre:

- 1 . Lavorazione del pezzo;
- 2 . Attesa del pezzo;
- 3 . Realizzazione di attività di manutenzione (programmate o inaspettate).

Per ciascuno di essi, è previsto un diverso fabbisogno di energia elettrica e questo è il motivo per cui deve essere fornita una distinzione precisa e classificazione di queste condizioni di funzionamento in modo da trovare in seguito il rapporto diretto tra il consumo energetico e il suo costo. Per rispondere a questa necessità, sono stati individuati i seguenti stati della macchina :

- 1 . Stato di processo (*process*);
- 2 . Stato di inattività (*idle*);
- 3 . Stato di ibernazione (*hybernation*).

Il primo, come facilmente intuibile, è il tempo cumulativo in cui la macchina lavora un singolo pezzo, ed è quindi esprimibile in funzione del tempo di processazione del pezzo e del numero di pezzi prodotti all'anno. Lo stato di inattività è il tempo globale in cui la macchina è in funzione, ma il pezzo non viene lavorato, indipendentemente da un eventuale arresto imprevisto del sistema produttivo o semplicemente a causa del tempo richiesto per cambiare il pezzo. Lo stato di ibernazione, infine, è quello caratterizzato dalla completa inattività della macchina utensile, che risulta semplicemente accesa con consumo nullo di energia. In conclusione, l'effettiva spesa energetica della macchina può essere derivata dalla quantificazione dei diversi tempi impiegati dalla macchina stessa nelle sue tre possibili condizioni operative.

Il consumo energetico legato agli spostamenti dipende dalla lunghezza del taglio, quindi dalla forma del taglio stesso, ma anche dalle forze di attrito e dalle forze di inerzia dovute ad accelerazioni e decelerazioni che la macchina incontra nel movimentare la testa di taglio.

La parte di consumo energetico dovuto al sistema di pompaggio, ovvero la parte di circuito idraulico destinata all'innalzamento della pressione, è dovuta sia al tempo attivo di lavorazione sia alla potenza della pompa, data da:

$$P = \frac{Q p}{\eta} \quad [W]$$

da cui deriva un consumo di energia pari a:

$$E = \frac{Q p \Delta t}{\eta} \quad [J]$$

dove  $\Delta t$  è il tempo attivo di taglio.

### 2.1.6 CONSIDERAZIONI SULLA QUALITA' DEL TAGLIO

I parametri di processo non hanno influenza solamente sul fenomeno fisico; la loro regolazione infatti ha ripercussioni anche sulla qualità del solco di taglio. Il controllo dei parametri di processo, unitamente ai fattori esterni, è quindi determinante per ottenere la geometria e la finitura ricercate.

Dal punto di vista strutturale, non si ha alterazione dei materiali metallici grazie all'acqua che funge anche da liquido refrigerante, permettendo un taglio a freddo. Sui materiali molto duttili si possono avere deformazioni locali sul pezzo e bave sul fondo del solco, ma in particolare è negli spigoli che la coda del getto risulta molto marcata sul fondo.

Dal punto di vista della finitura superficiale, il profilo di una superficie lavorata con getto d'acqua può essere suddiviso in due parti distinte, ondulazione e rugosità, i cui valori si differenziano in due precise zone: la zona superiore del solco è liscia e regolare, quindi può essere descritta dai parametri di rugosità, mentre la zona inferiore è striata e viene misurata in termini di parametri di ondulazione. Questo in conseguenza della diversa modalità di asportazione, che nella zona superiore avviene con piccoli angoli di impatto delle particelle, mentre nella zona inferiore è caratterizzata da grandi angoli di impatto.

Si ottiene un miglioramento della qualità di lavorazione in conseguenza ad una diminuzione delle rugosità superficiale se:

- la pressione dell'acqua aumenta;
- la velocità di avanzamento diminuisce;
- la portata di abrasivo aumenta (fino al limite);
- il getto è più coerente;
- il diametro del getto diminuisce;
- la lunghezza del focalizzatore diminuisce;
- il rapporto tra diametro focalizzatore e diametro ugello primario diminuisce (aumenta la potenza specifica e l'efficienza di miscelazione);
- si riduce la profondità di taglio;
- si riduce la dimensione delle particelle di abrasivo.

Valori tipici di rugosità superficiale per pezzi lavorati tramite AWJ sono attorno a  $R_a \approx 5 \mu m$ .

L'ondulazione superficiale (rugosità di ampia scala) è dovuta all'instabilità del processo e alle vibrazioni trasmesse al focalizzatore. In particolare si ottiene un miglioramento della qualità di lavorazione in conseguenza ad una diminuzione dell'ondulazione se:

- Diminuisce la velocità di avanzamento;
- Aumenta la portata di abrasivo;

- Aumenta la pressione della pompa;
- Aumenta la difficoltà di lavorazione del materiale.

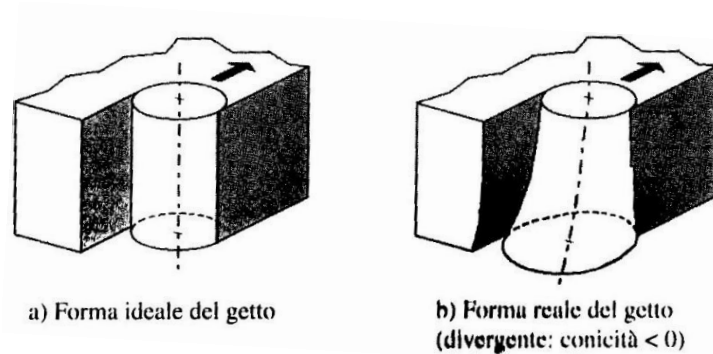


Figura 2.15: Differenza tra forma ideale e reale del getto [Monno, 2012]

La forma del solco tagliato dipende dalla forma spaziale del getto, che potrà essere conico convergente verso il fondo del solco fino a diventare divergente (figura 2.15) se diminuisce la velocità di avanzamento. La conicità aumenta con il crescere del diametro del focalizzatore e della distanza di stand-off e diminuisce con l'aumento della pressione e con la dimensione delle particelle. Le pareti generate dal taglio possono risultare parallele al raggiungimento del valore di velocità di inversione della conicità (figura 2.16)

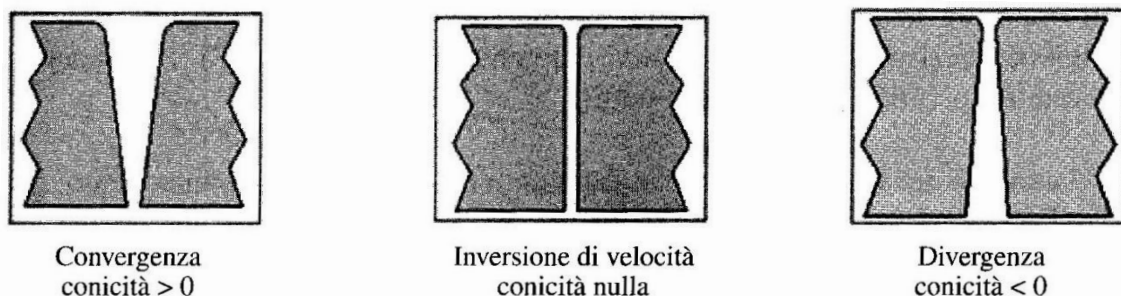


Figura 2.16: Significato fisico della velocità di inversione della conicità [Monno, 2012]

### 2.1.7 MODELLI ESISTENTI PER IL CALCOLO DEL COSTO TOTALE

Il tentativo di stimare il costo di taglio nell'utilizzo della tecnologia AWJ è stato fino ad ora oggetto di numerosi studi. Le voci di costo che vengono considerate nella stima totale sono suddivisibili in due principali categorie:

- costi fissi, che non variano con i volumi produttivi e quindi non dipendono dai parametri di lavorazione;
- costi variabili, che dipendono direttamente dalla quantità di materiale tagliato.

I primi incorporano il costo dell'investimento, o la quota di ammortamento, soltanto se imputabili ad una sola produzione. Rispetto ad esso i parametri di lavorazione non hanno nessun impatto. I costi variabili racchiudono invece tutte le spese economiche derivanti dalla scelta dei parametri tecnologici.

Nei modelli di determinazione del costo delle operazioni di taglio con tecnologia AWJ riscontrati in letteratura, si trascurano spesso i costi fissi. Tra i costi variabili vengono considerate [Monno, 2012] le seguenti componenti per il calcolo del costo orario:

- Costo della macchina, inteso come manutenzione della stessa;
- Costo della manodopera, includendo salari degli operatori e costi di supervisione;
- Costo dei materiali, componente in cui vengono sommati tutti i costi relativi all'abrasivo, all'acqua e agli ugelli;
- Costo dell'energia, che prende in considerazione la sola componente di consumo dovuta alla pompa, risultando quindi direttamente proporzionale alla potenza dell'impianto;
- Altri costi di manutenzione, controllo e posizionamenti.

In un precedente modello [Hashish, 2009], nella componente di costo relativa alla macchina, si differenzia invece la quota di ammortamento della stessa dalla parte dovuta alla sua manutenzione, intesa come una percentuale del costo del macchinario nuovo. Si introduce inoltre il costo di smaltimento dell'abrasivo, calcolato come maggiorazione percentuale del costo di acquisto dello stesso.

Nel modello successivo dello stesso autore [Hashish, 2012] viene data una spiegazione matematica di come alcune componenti di costo dipendano da vari parametri: il costo dell'ugello viene assunto come direttamente proporzionale alla pressione dell'acqua; il rendimento della pompa viene dichiarato decrescente con l'aumento della pressione dell'acqua; il costo dell'acqua di raffreddamento viene incluso nella componente generale di costo dell'acqua, la quale dipende dalla portata di acqua stessa; infine il costo di smaltimento viene assunto proporzionale al consumo di abrasivo.

Altre integrazioni si possono ricavare in [Holmqvist e Honsberg, 2008]; in particolare viene introdotto nel loro modello per il calcolo dei costi orari di taglio di lamiere in acciaio e alluminio, una componente relativa alla testa di taglio, scissa dal costo del focalizzatore e dell'ugello primario. Inoltre non viene considerata la manutenzione dell'intero macchinario, accanto a quella della pompa, ma solamente quella relativa alla tavola porta pezzo su cui avviene il taglio.

Infine in [Henning, 2008], viene mostrata l'importanza di una giusta scelta sulla portata di abrasivo, in quanto se troppo bassa ciò incide negativamente sull'efficienza del taglio, ma se troppo alta causa un aumento considerevole sui costi orari relativi al taglio AWJ. Il giusto compromesso deve inoltre essere trovato tra velocità di taglio e qualità di lavorazione: si mostra infatti come aumentando la velocità di avanzamento, ed avendo quindi indubbi vantaggi in termini di produttività, la risultante qualità del pezzo diminuisca, mostrando code

sempre più marcate incise sul pezzo stesso. Viene anche illustrato come l'aumento di pressione dell'acqua utilizzata per il taglio faccia diminuire di diversi punti percentuali il rendimento dell'intensificatore.

Se si pensa che in modelli precedenti [Zheng, Han, Chen, Yeo, 1996] venivano imputati per il calcolo della spesa oraria i soli costi imputabili alla manutenzione della macchina ed al consumo di acqua, abrasivo ed energia si può dedurre come l'analisi in questo campo abbia portato negli anni a varie integrazioni e miglioramenti apprezzabili, che necessitano tuttavia di nuovi approfondimenti.

## **2.2 TECNOLOGIA WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING**

Le lavorazioni mediante elettroerosione sono classificabili come lavorazioni non convenzionali di tipo termico in cui un materiale conduttore viene eroso da una successione di brevi scariche elettriche. Il processo presenta due varianti: elettroerosione a tuffo ed elettroerosione a filo, quest'ultima studiata nel presente elaborato. Essa prevede come elettrodo l'utilizzo di un filo metallico che produce nel pezzo un taglio sagomato tramite scariche elettriche successive, quindi l'asportazione del materiale per realizzare il pezzo ricercato si ottiene dalla combinazione degli effetti termici, elettrici e meccanici.

### **2.2.1 PRINCIPIO FISICO DI TAGLIO DEL MATERIALE**

Il pezzo e l'utensile, filo continuo conduttivo, hanno la funzione di elettrodi e sono collegati ai poli di un generatore di tensione. Il filo metallico, che funge da utensile, produce nel pezzo un taglio sagomato tramite scariche elettriche che erodono il materiale conduttore di energia elettrica. I due elettrodi sono mantenuti ad una piccola distanza, o gap, l'uno dall'altro, in modo che sia consentito il passaggio di un liquido dielettrico, iniettato coassialmente al filo; per aumentare infatti l'efficienza delle scariche, queste vengono fatte scoccare non in aria, ma all'interno del liquido dielettrico (tipicamente acqua deionizzata), che ha la funzione non solo di diminuire la sezione dell'arco e di rendere più controllabile la tensione di innesco della scarica, ma anche di agire da refrigerante e di rimuovere il materiale di scarto prodotto dalla lavorazione. Il fenomeno di comparsa delle scintille, che scoccano sempre singolarmente nel punto di minima resistenza elettrica, è agevolato dalla diminuzione del gap e dall'aumento della conducibilità del fluido. Nella modalità di taglio a filo sommerso, illustrata in figura 2.17, tutto il pezzo è immerso nel dielettrico allo scopo di poter aumentare la velocità di taglio mantenendo costante la temperatura di lavoro.

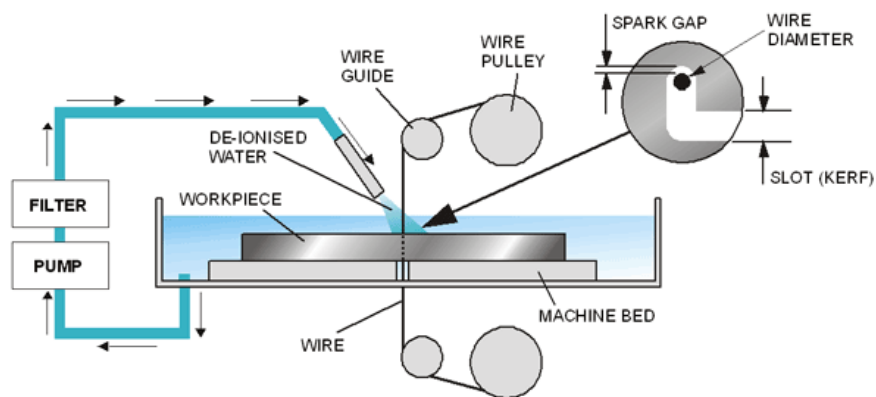


Figura 2.17: Schema di taglio per elettroerosione a filo

La frequenza delle scariche determina lo stato di finitura superficiale e la velocità di asportazione. Gli impulsi elettrici esercitano un'azione termica nel pezzo causando la fusione e la vaporizzazione sulla porzione colpita dalla scarica. Una volta terminato l'impulso, le bolle di vapore metallico collassano e il materiale dell'elettrodo e del pezzo viene espulso lasciando un cratere su entrambe le superfici. Piccoli frammenti di materiale solidificato repentinamente vengono rimossi dal liquido dielettrico. La sequenza di scariche e creazione dei crateri è molto veloce e si ripete a frequenze tali da ricoprire interamente la superficie da sottoporre a lavorazione. Il risultato è un'erosione uniforme sia dell'elettrodo (più lenta) che del pezzo (più rapida). Per minimizzare l'usura dell'utensile, anch'esso colpito dalle scariche, i parametri del processo, la polarità e il materiale stesso sono scelti appunto in modo che il tasso di rimozione dell'utensile sia una piccola frazione di quanto rimosso dalla superficie del pezzo; in particolare nell'elettroerosione a filo si utilizza la polarità inversa, cioè l'utensile è il catodo mentre il pezzo è l'anodo. Dato che utensile e pezzo non entrano mai in diretto contatto per evitare un corto circuito, non si generano forze di taglio durante il processo. Naturalmente non è possibile lavorare materiali che non siano conduttori di energia elettrica.

### 2.2.2 PARAMETRI DI PROCESSO E LORO INFLUENZA SULLE PRESTAZIONI DI TAGLIO

La selezione dei parametri di processo è determinante per definire l'accuratezza e la finitura superficiale. Le variazioni dell'intensità della corrente elettrica e della frequenza di scarica provocano effetti visibili sulla lavorazione. Inoltre, la distanza di scarica tra l'elettrodo-utensile e tra l'elettrodo-pezzo è fissata in relazione al valore attribuito alla corrente e alla tensione di scarica.

Il tempo di ciclo è la somma del tempo necessario per eseguire ciascuna delle tre fasi di cui si compone la lavorazione:



1. Ionizzazione del dielettrico: il ciclo inizia con l'applicazione di una differenza di potenziale attraverso il *gap* in cui è presente il liquido dielettrico per generare un canale conduttore tra i due elettrodi;
2. Scarica: la corrente elettrica comincia a passare e al suo crescere la tensione scende stabilizzandosi sul valore assegnato al *gap*; la corrente giunge al valore di picco e rimane costante per il tempo prefissato della durata di scarica;
3. Pausa: si interrompe la scarica aprendo il circuito; durante il tempo di pausa il dielettrico si deionizza e riprende le sue proprietà isolanti fino al successivo impulso elettrico.

I principali parametri di processo sono:

- Intervallo tra le scariche
- Durata dell'impulso
- *Duty cycle*
- Valore del *gap* frontale e laterale
- Corrente di scarica
- Frequenza di scarica

#### 2.2.2.1 TEMPO DI PAUSA

Si definisce tempo di pausa  $t_{off}$ , misurato in microsecondi, l'intervallo temporale che intercorre fra una scarica e quella successiva. Se la pausa è troppo breve rispetto alla durata della scarica, si verifica una grande asportazione di materiale; se prolungata in eccesso si riduce il numero di scintille al secondo e diminuisce quindi la velocità di erosione. Il tempo di pausa si stabilisce allora in funzione della durata degli impulsi di corrente in modo sperimentale direttamente sulla macchina, per raggiungere una condizione ottimale di lavoro.

#### 2.2.2.2 DURATA DI SCARICA ELETTRICA

Corrisponde alla durata dell'impulso  $t_{on}$ : impulsi di durata minima aumentano il tasso di rimozione del materiale ma determinano una maggior usura dell' utensile, com'è possibile notare da figura 2.18.

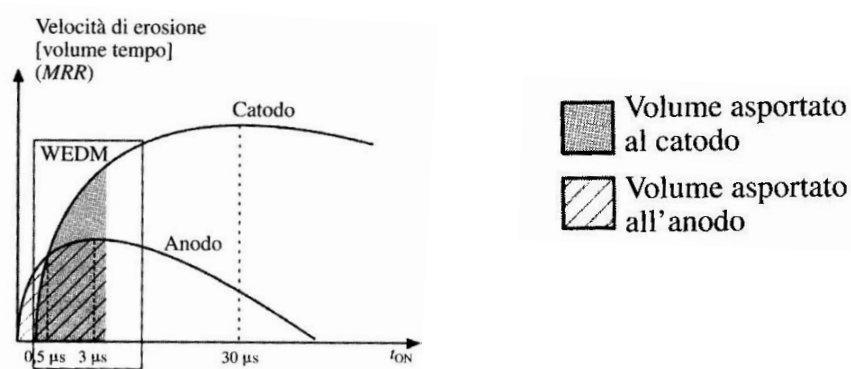


Figura 2.18: MRR al variare del tempo di scarica [Monno, 2012]

### 2.2.2.3 DUTY CYCLE

Il *duty cycle* deriva dal rapporto tra tempo di scarica e tempo di ciclo totale:

$$DC = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

### 2.2.2.4 GAP

Il *gap*, o distanza di scarica, è una delle caratteristiche più importanti del processo di elettroerosione, dato che consente l'innesco del processo senza contatto diretto tra utensile e pezzo. I parametri che definiscono la distanza misurata nella direzione di avanzamento dell'utensile (minore) e nella direzione perpendicolare a essa (maggiore) sono rispettivamente indicati con il termine *gap frontale* (0,025 ÷ 0,125 mm) e *gap laterale* (0,25 ÷ 0,5 mm). Il gap frontale diminuisce all'aumentare della velocità di avanzamento ed all'aumentare del tasso di rimozione del materiale. Quanto più vicine sono le superfici tanto maggiore è l'intensità di corrente, quindi l'asportazione del materiale e l'usura dell'utensile aumentano.

### 2.2.2.5 CORRENTE DI SCARICA

L'aumento dell'intensità di corrente nel circuito provoca la formazione di crateri più grandi sul pezzo lavorato; ciò significa che, mantenendo costanti i restanti parametri, all'aumentare della corrente ciascuna scarica rimuove un quantitativo maggiore di materiale, aumentando così la rugosità superficiale. Se maggiore è il valore dell'intensità di corrente e minore è la

durata di scarica, la velocità di rimozione risulta inferiore e la finitura superficiale di qualità elevata; al contrario per valori inferiori dell'intensità di corrente e maggiore durata di scarica, si ha velocità di rimozione superiore e finitura di bassa qualità.

#### 2.2.2.6 FREQUENZA DI SCARICA

La frequenza di scarica è definita come l'inverso del tempo di ciclo:

$$f = \frac{1}{t_{on} + t_{off}}$$

Aumentando la frequenza di scarica, aumenta la qualità superficiale del pezzo poiché si riduce il tempo di scarica e i crateri risultano più piccoli.

#### 2.2.3 MODELLO DI PRODUTTIVITA' DEL PROCESSO

Nel caso di lavorazione per elettroerosione è possibile determinare il rateo di asportazione del materiale, essendo esso un processo termico, come:

$$MRR = \frac{W}{\rho H} \quad [m^3/s]$$

Dove W è la potenza assorbita dal pezzo, valutabile come:

$$W = \eta * V_{scarica} * I_{peak} * DC \quad [W]$$

Con:

- $\eta$  = percentuale di potenza assorbita dal pezzo;
- $V_{scarica}$  = tensione di scarica [V];
- $I_{peak}$  = corrente di picco [A];
- $DC$  = *duty cycle*.

A denominatore troviamo invece:

- $\rho$  = densità materiale [Kg/m<sup>3</sup>]
- $H$  = energia specifica necessaria per vaporizzare 1kg di materiale [J/Kg], valutabile come:

$$H = C_s (T_f - T_a) + H_f + C_l (T_v - T_f) + H_v$$

Dove:

- $C_s$  e  $C_l$  rispettivamente i calori specifici allo stato solido ed allo stato liquido del materiale [ $J/^\circ C \text{ kg}$ ]
- $T_a$ ,  $T_f$  e  $T_v$  rispettivamente le temperature ambiente, di fusione e di vaporizzazione del materiale [ $^\circ C$ ];
- $H_f$  e  $H_v$  rispettivamente i calori latenti di fusione e di vaporizzazione del materiale [ $J/kg$ ].

Valori tipici del rateo di asportazione nel caso di lavorazione WEDM sono di:

$$MRR \approx 10^2 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Il rateo di asportazione può crescere aumentando la tensione di scarica, la corrente di picco o il tempo di scarica, a discapito della qualità di lavorazione ottenuta. Per ottenere un giusto compromesso tra velocità di rimozione e rugosità superficiale, si possono ridurre contemporaneamente  $t_{on}$  e  $t_{off}$ .

#### 2.2.4 CONSUMO MATERIALI

L'unico materiale consumato durante la lavorazione WEDM è l'elettrodo utensile. Il filo, infatti, viene immagazzinato in una bobina e continuamente cambiato durante la lavorazione, in quanto, essendo sottoposto all'usura delle scariche e allo stress di dilatazione, finirebbe per spezzarsi spesso, interrompendo la lavorazione. L'usura del filo può dipendere da molteplici fattori:

- il materiale del filo, che si consuma diversamente; in particolare esso è in genere costituito da acciaio rivestito in rame e ottone, ma nel caso di lavorazioni ad alta velocità, per cui è richiesto l'incremento dell'efficienza del lavaggio e dell'energia di scarica, si utilizza un filo in ottone rivestito di zinco;
- la velocità di riavvolgimento sulla bobina, in particolare il consumo del filo aumenta con essa attraverso una relazione lineare;
- durata dell'impulso; impulsi di durata minima determinano un'usura dell'utensile superiore rispetto ad impulsi di durata maggiore, come mostrato in figura 2.19;
- gap tra filo e pezzo; riducendo il gap, l'usura aumenta.

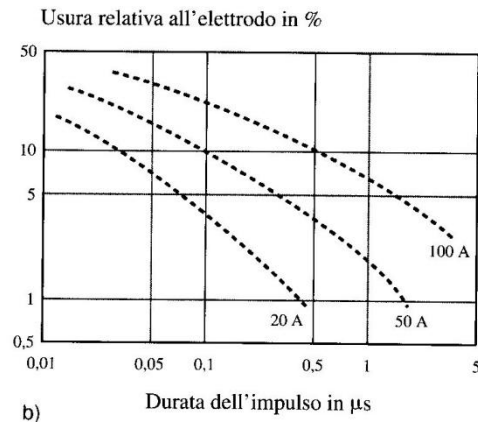


Figura 2.19: Andamento dell'usura relativa all'elettrodo in funzione della durata dell'impulso [Monno, 2012]

Simmetricamente al consumo di materiale del pezzo in lavorazione, è possibile determinare il consumo del filo associando anch'esso ad un rateo di asportazione, valutabile come:

$$MRR_f = \eta_f \frac{V I_{DC}}{\rho_f H_f} \quad [m^3/s]$$

In cui  $V$ ,  $I$ ,  $DC$  risultano essere gli stessi termini del  $MRR$  del materiale (rif. Par. 2.2.3), mentre:

- $\eta_f$  = percentuale di potenza assorbita dal filo;
- $\rho_f$  = densità del filo [ $Kg/m^3$ ];
- $H_f$  = energia specifica necessaria per vaporizzare 1kg di materiale costituente il filo [ $J/Kg$ ].

### 2.2.5 CONSUMO ENERGETICO

Il consumo energetico durante una lavorazione per elettroerosione è dovuto in parte alla macchina ed ai suoi spostamenti, in parte al generatore di tensione.

La parte di consumo dovuto alla macchina dipende dalle condizioni di lavoro della macchina stessa, sostanzialmente diverse in dipendenza sia della pianificazione produttiva sia dell'efficienza dell'apparecchiatura secondaria dello specifico stabilimento in cui la macchina è installata. In particolare, le operazioni che dovrebbero essere eseguite dalla e sulla macchina sono essenzialmente tre:

- 1 . Lavorazione del pezzo;
- 2 . Attesa del pezzo;
- 3 . Realizzazione di attività di manutenzione (programmate o inaspettate).

Per ciascuno di essi, è previsto un diverso fabbisogno di energia elettrica e questo è il motivo per cui deve essere fornita una distinzione precisa e classificazione di queste condizioni di funzionamento in modo da trovare in seguito il rapporto diretto tra il consumo energetico e il suo costo. Per rispondere a questa necessità, sono stati individuati i seguenti stati della macchina :

- 1 . Stato di processo (*process*);
- 2 . Stato di inattività (*idle*);
- 3 . Stato di ibernazione (*hybernation*).

Il primo, come facilmente intuibile, è il tempo cumulativo in cui la macchina lavora un singolo pezzo, ed è quindi esprimibile in funzione del tempo di processazione del pezzo e del numero di pezzi prodotti all'anno. Lo stato di inattività è il tempo globale in cui la macchina è in funzione, ma il pezzo non viene lavorato, indipendentemente da un eventuale arresto imprevisto del sistema produttivo o semplicemente a causa del tempo richiesto per cambiare il pezzo. Lo stato di ibernazione, infine, è quello caratterizzato dalla completa inattività della macchina utensile, che risulta semplicemente accesa con consumo nullo di energia. In conclusione, l'effettiva spesa energetica della macchina può essere derivata dalla quantificazione dei diversi tempi impiegati dalla macchina stessa nelle sue tre possibili condizioni operative.

Il consumo energetico legato agli spostamenti dipende dalla lunghezza del taglio, quindi dalla forma del taglio stesso, ma anche dalle forze di attrito e dalle forze di inerzia dovute ad accelerazioni e decelerazioni che la macchina incontra nel movimentare la testa di taglio.

La parte di consumo energetico dovuto al generatore di tensione al quale sono collegati i due elettrodi, ovvero filo e pezzo, dipende dal valore di tensione di scarica e dal tempo attivo di lavorazione ed è valutabile come:

$$E = \frac{V \ I \ DC}{\eta} \Delta t \quad [J]$$

## 2.2.6 CONSIDERAZIONI SULLA QUALITA' DEL TAGLIO

Durante il processo di lavorazione, le scariche elettriche a intervalli regolari provocano l'erosione del materiale, lasciando sul pezzo piccoli crateri. E' possibile sviluppare un modello di rugosità [Chattopadhyay, 2009], modellizzando i crateri formatisi come cavità sferiche. Indicando con  $\Gamma$  il volume della cavità sferica, avremo:

$$\Gamma = \frac{2\pi r^3}{3} \quad [mm^3]$$

dove si può assumere che il raggio della sfera sia pari all'altezza media delle asperità, ovvero:

$$r = h_m \text{ [mm]}$$

Essendo il volume di ciascuna sfera direttamente proporzionale all'energia di scarica necessaria per formarla, ne risulta che il relativo raggio, ovvero l'altezza media, sia anch'essa proporzionale all'energia di scarica, quindi:

$$\Gamma \propto E_s \Rightarrow h_m \propto E_s$$

$$\text{Dove } E_s = V I t_{on}$$

Dunque si può ricavare:

$$h_m \propto \{\Gamma\}^{1/3} \propto \{E_s\}^{1/3} \propto \{V I t_{on}\}^{1/3}$$

$$h_m \propto \{V I t_{on}\}^{1/3}$$

Ovvero l'altezza media delle asperità sul pezzo derivanti dal taglio per elettroerosione è direttamente proporzionale alla radice cubica della tensione di scarica, della corrente di picco e del tempo di scarica.

Valori tipici di rugosità per lavorazioni WEDM sono attorno a  $R_a \approx 20 \mu\text{m}$ .

Al crescere dell'energia di scarica e al prolungamento della durata dell'impulso, aumenta il gap tra pezzo ed utensile ed aumenta inoltre la rugosità della superficie. Nelle lavorazioni di sgrossatura il tempo di scarica e l'intensità di corrente sono fissati ad un valore elevato per ottenere un corretto MRR a discapito della qualità superficiale; ne deriva un'elevata rugosità.

La seguente figura 2.20 mostra l'andamento della rugosità superficiale in funzione del tempo di scarica, della corrente e della quantità di materiale. Come si osserva l'aumento dell'intensità di corrente non solo consente l'aumento della quantità di materiale rimosso nell'unità di tempo, ma anche causa anche un aumento di rugosità superficiale.

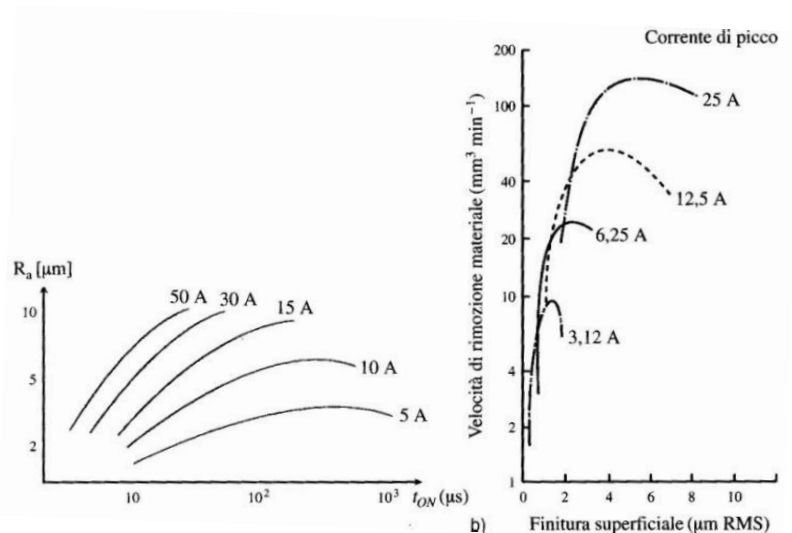


Figura 2.20: Andamento della rugosità in funzione del tempo di scarica e della corrente; andamento del MRR in funzione della finitura superficiale [Monno, 2012]

L'azione delle scariche non solo è responsabile della formazione di crateri sulla superficie, ma l'effetto delle temperature elevate durante il processo ( $8.000-12.000^\circ\text{C}$ ) è responsabile di cambiamenti metallurgici sulla superficie del pezzo, la quale prima fonde poi solidifica per l'effetto refrigerante del dielettrico. La zona adiacente risulta invece termicamente alterata, poi segue una zona di conversione in cui non c'è una modifica strutturale del grano del materiale, ma solo un effetto del calore sviluppato (figura 2.21).

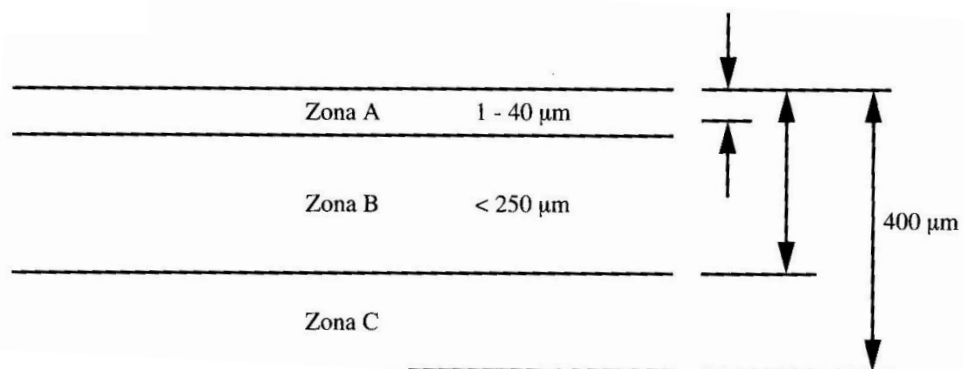


Figura 2.21: ZTA (zona termicamente alterata) nelle lavorazioni WEDM [Monno, 2012]

### 2.2.7 MODELLI ESISTENTI PER IL CALCOLO DEL COSTO TOTALE

A confronto con la tecnologia AWJ, in letteratura risultano essere in numero molto inferiore i modelli esistenti per il calcolo del costo di una lavorazione WEDM. Non vengono presentati studi per una valutazione economica di tale processo a sé stante. L'interesse nello studio del WEDM si manifesta infatti principalmente nel confronto con altre metodologie di taglio dei



materiali e quindi nella possibile valutazione dei soli costi differenziali tra elettroerosione a filo ed altre tecnologie.

Nel modello presentato in [Uriarte, Herrero, Ivanov, Oosterling, Staemmeler, Tang, Allen, 2006], viene illustrata una comparazione tra WEDM e taglio per fresatura, così come emerge anche da successivi altri studi [Klocke, Zeis, Klink, Veselovac, 2013]. La convenienza economica dei suddetti modelli considera il confronto sulla base di vari parametri; ad esempio si pone in luce come le tradizionali tecnologie per asportazione di truciolo consentano il raggiungimento di livelli più elevati di MRR oppure come la rugosità del pezzo sottoposto ad erosione sia inferiore di un ordine di grandezza rispetto ad un materiale tagliato per fresatura. Il vantaggio principale del processo di elettroerosione rispetto a tecnologie convenzionali risulta però essere la non dipendenza del materiale asportato nell'unità di tempo dalla durezza del materiale; per le lavorazioni tradizionali per asportazione di truciolo il parametro MRR diminuisce all'aumento della durezza del materiale. Le voci di costo prese in considerazione nel confronto risultano essere:

- Il costo di investimento iniziale, nettamente inferiore nel caso WEDM;
- Il costo di manodopera, superiore nell'utilizzo di una fresatrice in quanto si suppone che sia necessaria la supervisione di un operatore a macchina mentre in caso di WEDM un operatore si ipotizza possa lavorare su tre macchine contemporaneamente;
- Il costo di utilizzo annuo poiché un macchinario WEDM potendo essere fatto lavorare senza supervisione, può operare un turno in più al giorno rispetto ad una fresatrice e conseguentemente un numero superiore di ore l'anno.

L'ovvia conclusione è che molto deve essere ancora fatto in materia; lo sviluppo di un modello di costo per una lavorazione per elettroerosione necessita senza dubbio di ulteriori integrazioni ed approfondimenti rispetto al presente stato dell'arte.

## **2.3 TECNOLOGIA DI TAGLIO PER FRESATURA**

La fresatura è un processo molto diffuso in ambito manifatturiero per la pluralità di operazioni che possono essere effettuate su pezzi di varia forma. E' una lavorazione meccanica per asportazione di truciolo effettuata da un utensile che ruota attorno ad un proprio asse su un pezzo in moto di avanzamento. L'utensile utilizzato nella fresatura, detto fresa, è generalmente di forma cilindrica e costituito da più taglienti ricavati sulla superficie cilindrica e/o su una delle basi, mentre le macchine utilizzate per tale lavorazione sono chiamate fresatrici. E' riportata una schematizzazione di tale lavorazione in figura 2.22.

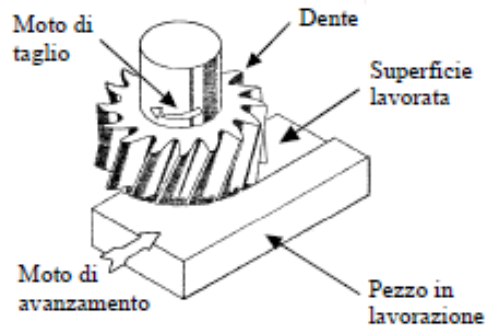


Figura 2.22: Schematizzazione di una lavorazione per fresatura

### 2.3.1 PRINCIPIO FISICO DI TAGLIO DEL MATERIALE

Il processo di taglio mediante utensile rotante è un processo per deformazione plastica ad asportazione di truciolo nel quale un utensile, dotato di moto relativo rispetto a un pezzo, ne asporta uno strato superficiale detto sovrametallo. Esso viene quindi trasformato in truciolo, generando così una superficie con le caratteristiche di precisione e rugosità concordi con le specifiche del pezzo. L'output del processo è pertanto una superficie, mentre il truciolo è lo scarto di lavorazione. Il processo avviene grazie a uno o più moti forniti da una macchina utensile, denominata fresatrice. La lavorazione è svolta a temperatura ambiente, tuttavia il calore sviluppato sia dal lavoro di deformazione plastica sia dalle forze di attrito causa un innalzamento di temperatura del pezzo, dell'utensile e del truciolo. I movimenti delle operazioni di fresatura sono i seguenti:

- Il moto di taglio è sempre rotatorio continuo e posseduto dall'utensile chiamato fresa;
- il moto di alimentazione è posseduto dal pezzo ed è di tipo rettilineo o curvilineo continuo;
- il moto di appostamento, necessario per regolare lo spessore di sovrametallo da asportare, è posseduto dal pezzo o dall'utensile.

La modalità di asportazione del truciolo in fresatura per una lamiera metallica avviene principalmente a taglio frontale, come schematizzato in figura 2.23: l'asse di rotazione della fresa è normale alla superficie lavorata e ogni dente asporta un truciolo con spessore poco variabile tra il punto di ingresso e quello di uscita. Le frese cilindrico-frontali sono utensili pluritaglienti con taglienti disposti su una superficie cilindrica e su una piana perpendicolare all'asse della prima: ogni dente, con relativo petto e fianco costituenti il tagliente, è assimilabile ad un utensile monotagliante. Le frese tipicamente utilizzate per il taglio di lamiere sono a codolo cilindrico o conico e possono essere realizzate o completamente in acciaio superrapido o con taglienti in carburi sinterizzati fissati meccanicamente sul corpo in acciaio. Presentano inoltre denti denominati denti fresati o denti di sega, in numero crescente quanto più il materiale da lavorare presenta caratteristiche di durezza, perché ogni dente in questo modo si usura poco.



Figura 2.23: Fresatura periferico-frontale

### 2.3.2 PARAMETRI DI PROCESSO E LORO INFLUENZA SULLE PRESTAZIONI DI TAGLIO

Un'azienda che, per realizzare il proprio prodotto, prevede all'interno del processo produttivo un'operazione da eseguire ad una macchina utensile, deve valutare e determinare, esattamente come nei precedenti casi, i parametri influenti sulla lavorazione in esame. Nel caso di taglio per fresatura abbiamo:

- Velocità di taglio;
- Velocità di avanzamento;
- Profondità di passata;
- Diametro della fresa;
- Numero di denti della fresa.

#### 2.3.2.1 VELOCITA' DI TAGLIO

La velocità di taglio, essendo collegata al moto di taglio, quando quest'ultimo è rotatorio, coincide con la velocità periferica dell'utensile. La velocità di taglio economica viene determinata in base sia ai materiali del pezzo e dell'utensile, sia alla durata dell'utensile. Quest'ultima risulta essere particolarmente importante: infatti, dal momento che il tempo di sostituzione e di affilatura dell'utensile è piuttosto elevato, si ha convenienza ad adottare un compromesso tra velocità di taglio e durata. Essendo essa il parametro associato al moto di taglio, è data da:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

Dove:

- $D$  = diametro fresa [mm]
- $n$  = velocità angolare [giri/min], funzione della velocità di taglio impostata.

Un aumento della velocità di taglio porta ad un miglioramento della finitura superficiale.

### 2.3.2.2 VELOCITA' DI AVANZAMENTO

È il parametro associato al moto di alimentazione e si esprime con la relazione:

$$V_a = a_z n Z \quad [\text{mm/min}]$$

Dove:

- $a_z$  = avanzamento per dente [mm];
- $Z$  = numero di denti della fresa, funzione del tipo di fresa, del diametro e del tipo di esecuzione.

Il valore dell'avanzamento per dente influenza lo spessore del truciolo e quindi le forze di taglio e la potenza, nonché la finitura superficiale.

Quindi la velocità di avanzamento influisce in modo notevole sulla finitura superficiale; infatti, per alte velocità, usate soltanto per sgrossatura, si ottengono superfici ondulate, dove rimangono visibili le linee (cicloidi) delle traiettorie dei taglienti. Normalmente sono consigliati valori dell'avanzamento a dente elevati, compatibilmente con la resistenza dell'utensile, con il grado di finitura richiesto e con la potenza disponibile, in quanto un elevato valore dell'avanzamento si oppone all'insorgere di vibrazioni autoeccitate.

### 2.3.2.3 PROFONDITA' DI PASSATA

È il parametro associato al moto di appostamento e si misura in millimetri. Col crescere della profondità di passata, aumentano la potenza assorbita e le forze di taglio, con conseguente pericolo di vibrazioni e di irregolarità nella finitura superficiale.

Normalmente, i valori della profondità di passata, secondo le lavorazioni, sono:

Lavorazione	Profondità di passata (mm)
Fresatura Larga	0,05 ... 0,10
Fresatura di precisione	0,3 ... 0,5
Fresatura di finitura	0,4 ... 1,4
Fresatura di sgrossatura	≤ 10

#### 2.3.2.4 DIAMETRO DELLA FRESA

Il diametro della fresa, misurato anch'esso in millimetri, dipende dalla velocità di taglio impostata, com'è possibile notare dalla seguente figura 2.24:

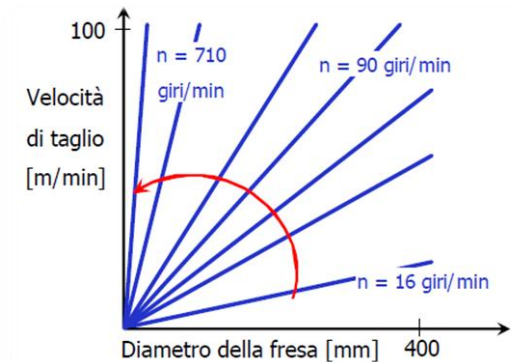


Figura 2.24: Velocità di taglio in funzione del diametro della fresa

#### 2.3.2.5 NUMERO DI DENTI

Nel caso di fresa che presenti denti fresati o denti di sega, i taglienti risultano essere in numero ed angolo di affilatura variabili in funzione dell'esecuzione. In particolare è possibile distinguere:

Esecuzione N:

- Materiali di durezza normale
- Molti denti
- Angoli  $\alpha = 4-5^\circ$  e  $\gamma = 5-10^\circ$

Esecuzione D:

- Materiali molto duri
- Pochi denti robusti
- Angoli  $\alpha = 3-4^\circ$  e  $\gamma = 3-8^\circ$

Esecuzione T:

- Materiali teneri
- Pochissimi denti
- Angoli  $\alpha = 6-8^\circ$  e  $\gamma = 15-25^\circ$

Noti i suddetti parametri risulta quindi opportuno adottare:

- Massime sezioni del truciolo compatibilmente con lo sforzo che la macchina può sopportare;
- Velocità di taglio ed avanzamenti devono essere i più elevati possibili compatibilmente con la potenza disponibile sulla macchina, che dovrà eventualmente essere sfruttata completamente variando la profondità di taglio;
- Per lavori di finitura adottare alte velocità di taglio e avanzamenti bassi.

### 2.3.3 MODELLO DI PRODUTTIVITA' DEL PROCESSO

Nelle lavorazioni per asportazione di truciolo con utensile rotante è possibile valutare quantitativamente il tasso di rimozione del materiale con la seguente formula:

$$MRR = 10^3 v \frac{B a_z Z}{\pi D} p \quad [\text{mm}^3/\text{min}]$$

Dove:

- $v$  = velocità di taglio [m/min];
- $B$  = larghezza del taglio [mm], coincidente con il diametro  $D$  della fresa;
- $a_z$  = avanzamento per dente [mm];
- $Z$  = numero di denti;
- $p$  = profondità di passata [mm], coincidente con lo spessore  $s$  della lamiera;
- $D$  = diametro della fresa [mm].

Quindi:

$$MRR = 10^3 v \frac{a_z Z}{\pi} S \quad [\text{mm}^3/\text{min}]$$

Valori tipici del rateo di rimozione nel caso di taglio per fresatura sono:

$$MRR \approx 10^5 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Come già visto, nel caso di lavorazioni convenzionali per asportazione di truciolo, il MRR decresce all'aumentare della durezza del materiale in lavorazione, al contrario ad esempio di quanto avviene nel taglio per elettroerosione. E' possibile notarlo da figura 2.25:

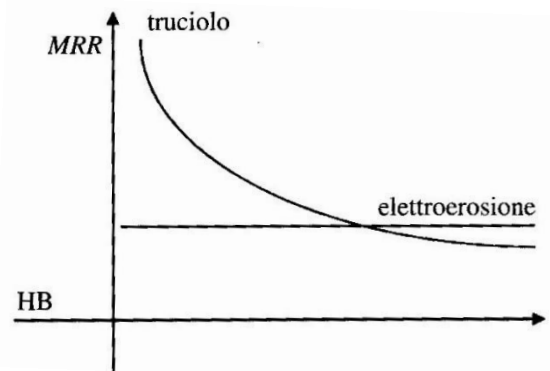


Figura 2.25: Andamento qualitativo del parametro MRR in funzione della durezza del materiale per la tecnologia WEDM e per la fresatura [Monno, 2012]

#### 2.3.4 CONSUMO MATERIALI

Ciò che si consuma principalmente durante un taglio per fresatura è l'utensile utilizzato, ovvero la fresa. Indipendentemente dal materiale di cui è costituito, l'utensile non mantiene la geometria iniziale per un tempo infinito ma, a causa delle sollecitazioni meccaniche, termiche e chimiche che subisce durante la lavorazione, presenta inevitabilmente fenomeni di usura, in base alla cui evoluzione viene stabilita la durata, cioè il tempo di taglio in cui l'utensile è in grado di svolgere correttamente le sue funzioni. I principali meccanismi di usura sono i seguenti:

- Usura per abrasione, per la presenza nel pezzo lavorato di particelle ad elevata durezza non uniformemente distribuite;
- Usura per diffusione, favorita dalle alte temperature che si sviluppano durante il taglio e causata dal passaggio di particelle tra il materiale dell'utensile ed il materiale del pezzo in caso di affinità chimica;
- Usura per ossidazione, dovuta alla combinazione con l'ossigeno atmosferico del materiale della fresa che dà luogo ad ossidi facilmente asportabili dal truciolo;
- Usura per adesione, causata dalla formazione del tagliente di riporto e favorita da basse temperature e basse velocità di taglio
- Usura per deformazione plastica, causata da deformazione plastica per compressione o per scorrimento sotto l'azione di elevate sollecitazioni meccaniche e termiche;
- Usura per fatica, causata da ripetute variazioni di forza e temperatura.

L'usura della fresa dipende da vari fattori tra cui:

- Tipologia di materiale da tagliare, in particolare durezza del materiale stesso;
- Velocità di taglio, ovvero l'usura aumenta al suo crescere;

- Avanzamento per dente, in quanto la fresa si consuma maggiormente per elevati avanzamenti.

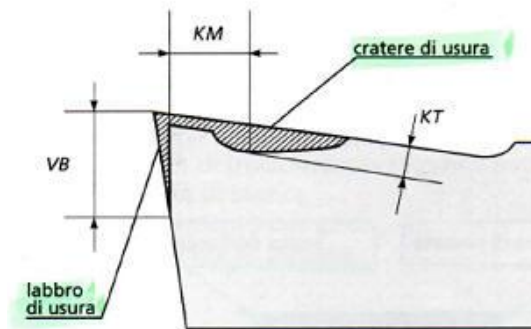


Figura 2.26: Rappresentazione dello stato di usura dell'utensile [Santochi, 2000]

Le forme più comuni di usura sono quella sul fianco e sul petto. L'usura sul petto si manifesta come una cavità detta cratere di usura, mentre il labbro di usura può interessare, oltre al fianco principale e al raggio di raccordo tra i taglienti, anche il fianco secondario. La rappresentazione quantitativa di queste due forme di usura richiede il rilevamento di 3 grandezze, riportate in figura 2.26:

- VB: larghezza del labbro di usura sul fianco principale;
- KT: profondità del cratere di usura sulla faccia dell'utensile;
- KM: distanza del punto medio del cratere dallo spigolo del tagliente, indipendente dal tempo di taglio.

E' possibile determinare sperimentalmente la relazione esistente tra la durata e la velocità di taglio, considerando fissi tutti gli altri parametri, secondo i famosi studi di Taylor, risalenti al 1907. Dopo una serie di prove si determina la durata dell'utensile in minuti per varie velocità di taglio, riportando ed interpolando con una retta media i valori ottenuti su un grafico doppio logaritmico. Tale retta è l'espressione grafica della relazione di Taylor:

$$v T^n = V_1$$

dove:

- $v$  = velocità di taglio [m/min];
- $T$  = durata del tagliente dell'utensile [min];
- $n$  = coefficiente di durata del tagliente;
- $V_1$  = velocità di taglio che consente la durata dell'utensile pari ad un minuto; rappresenta la costante dipendente dagli altri parametri di taglio.



### 2.3.5 CONSUMO ENERGETICO

Il consumo energetico durante una lavorazione per fresatura è dovuto alla macchina utensile fresatrice ed ai suoi spostamenti.

La parte di consumo dovuto alla macchina dipende dalle condizioni di lavoro della macchina stessa, sostanzialmente diverse in dipendenza sia della pianificazione produttiva sia dell'efficienza dell'apparecchiatura secondaria dello specifico stabilimento in cui la macchina è installata. In particolare, le operazioni che dovrebbero essere eseguite dalla e sulla macchina sono essenzialmente tre:

- 1 . Lavorazione del pezzo;
- 2 . Attesa del pezzo;
- 3 . Realizzazione di attività di manutenzione (programmate o inaspettate).

Per ciascuno di essi, è previsto un diverso fabbisogno di energia elettrica e questo è il motivo per cui deve essere fornita una distinzione precisa e classificazione di queste condizioni di funzionamento in modo da trovare in seguito il rapporto diretto tra il consumo energetico e il suo costo. Per rispondere a questa necessità, sono stati individuati i seguenti stati della macchina :

- 1 . Stato di processo (*process*);
- 2 . Stato di inattività (*idle*);
- 3 . Stato di ibernazione (*hybernation*).

Il primo è il tempo cumulativo in cui la macchina lavora un singolo pezzo, ed è quindi esprimibile in funzione del tempo di processazione del pezzo e del numero di pezzi prodotti all'anno. Lo stato di inattività è il tempo globale in cui la macchina è in funzione, ma il pezzo non viene lavorato, indipendentemente da un eventuale arresto imprevisto del sistema produttivo o semplicemente a causa del tempo richiesto per cambiare il pezzo. Lo stato di ibernazione, infine, è quello caratterizzato dalla completa inattività della macchina utensile, che risulta semplicemente accesa con consumo nullo di energia. In conclusione, l'effettiva spesa energetica della macchina può essere derivata dalla quantificazione dei diversi tempi impiegati dalla macchina stessa nelle sue tre possibili condizioni operative.

Il consumo energetico legato agli spostamenti dipende dalla lunghezza del taglio, quindi dalla forma del taglio stesso, ma anche dalle forze di attrito e dalle forze di inerzia dovute ad accelerazioni e decelerazioni che la macchina incontra nel movimentare la testa di taglio. Diversamente dalle altre tre tipologie di taglio analizzate in questo elaborato, durante un processo di fresatura si ha un contatto diretto tra utensile e pezzo; pertanto il consumo energetico è dovuto in parte anche alla forza resistente durante il taglio. Essa risulta uguale ed opposta alla forza di taglio, con valore medio:

$$F_r = P_t \cdot S \cdot Z_i \quad [N]$$

Dove:

- $Z_i$  = numero di denti in presa;
- $S$  = sezione del truciolo [ $\text{mm}^2$ ];
- $P_t$  = pressione di taglio [MPa] deducibile dal seguente grafico (figura 2.27) in cui viene rappresentata in funzione dello spessore medio effettivo per vari materiali.

*Pressione di taglio media  $k_{sm}$  in funzione dello spessore medio  $h_m$ .*

- a) acciai ( $R_m = 500 \div 700 \text{ N/mm}^2$ ),  
 b) ghisa sferoidale,  
 c) ghisa grigia,  
 d) ottone.

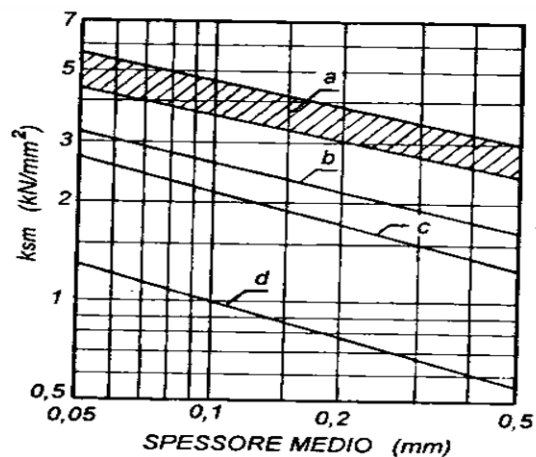


Figura 2.27: Pressione di taglio in funzione dello spessore medio [Santochi, 2000]

### 2.3.6 CONSIDERAZIONI SULLA QUALITA' DEL TAGLIO

La rugosità superficiale del pezzo finale dipende dagli angoli di profilo dei denti in combinazione con il valore di avanzamento della fresa. Nella finitura l'utilizzo di una velocità superiore porta a migliori caratteristiche di rugosità superficiale.

Il grado di finitura del pezzo in fresatura frontale è influenzato:

- Dall'avanzamento del dente  $a_z$ ;
- Dal raggio di punta dell'inserto;
- Dalla velocità di avanzamento della fresa;
- Dal raggio della fresa.

Per migliorare la finitura spesso l'inserto presenta, in luogo del raggio di raccordo, due brevi tratti rettilinei uno dei quali quasi parallelo alla superficie del pezzo.

Valori tipici di rugosità superficiale nella fresatura sono di  $R_a \approx 1 \mu\text{m}$ .

Essendo i metodi di lavoro in discorde e in concorde a seconda che l'avanzamento della tavola vada rispettivamente contro o favorisca il senso di rotazione dell'utensile durante il

taglio, il grado di finitura dipenderà anche da come è stata effettuata la lavorazione (figura 2.28), ovvero:

- concordanza, dunque la superficie del pezzo risulta di migliore qualità;
- opposizione, ne deriva una peggiore finitura superficiale.

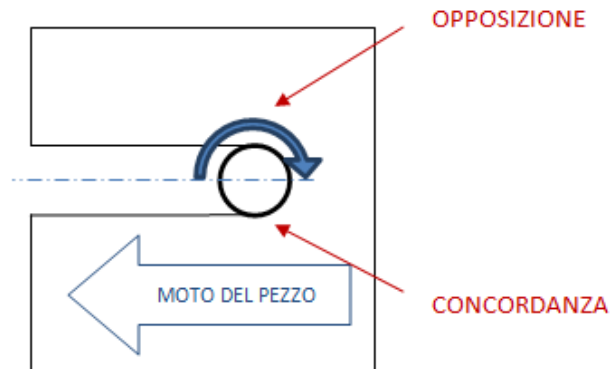


Figura 2.28: Vista dall'alto del taglio di una lamiera in opposizione ed in concordanza

La potenza assorbita durante il taglio viene quasi interamente trasformata in calore che si sviluppa entro un volume assai limitato, dando così luogo a notevoli aumenti di temperatura che influenzano sia la resistenza meccanica che la resistenza all'usura dell'utensile, sia l'accuratezza di lavorazione per effetto delle deformazioni termiche.

I tre contributi in cui possiamo scomporre la potenza assorbita nel taglio sono:

- Potenza assorbita nella zona di deformazione primaria: produce soprattutto l'aumento della temperatura del truciolo;
- Potenza dissipata per attrito nella zona di deformazione secondaria: è smaltita in parte come aumento di temperatura del truciolo e in parte come aumento di temperatura del petto che, essendo stazionario rispetto alle fonti di calore, può smaltirlo solo per conduzione ed irraggiamento;
- Potenza assorbita nella zona di deformazione terziaria: risulta poco influente.

Le temperature medie del truciolo e della superficie lavorata, raggiunto il regime adiabatico, sono stazionarie e indipendenti dalla velocità di taglio di cui è invece funzione crescente la temperatura del petto dell'utensile. In particolare la ripartizione del calore tra truciolo (Q), utensile (Q') e pezzo (Q'') risulta:

- $V_t$  basse:  $Q/Q'/Q''=50/25/25$
- $V_t$  medio-alte (normali condizioni di taglio):  $Q/Q'/Q''=80/10/10$

### 2.3.7 MODELLI ESISTENTI PER IL CALCOLO DEL COSTO TOTALE

Fino ad oggi gli studi economici relativi alle lavorazioni per asportazione di truciolo sono stati condotti principalmente allo scopo di ottimizzare tre parametri fondamentali nel taglio, ovvero la velocità, l'avanzamento e la profondità di passata, per varie ragioni, tra cui la maggior influenza da essi esercitata sulla durata dell'utensile, la scarsa mole di dati sperimentali necessari ad un'approfondita analisi e la complessità di un'analisi contemporanea di un numero elevato di fattori indipendenti.

Nel modello di analisi economica per un'operazione di fresatura proposto da Santochi [Santochi, 2000] troviamo il calcolo del contributo di costo dei seguenti componenti:

- Costo unitario del posto di lavoro, riassumendo in esso costo unitario della macchina operatrice, ammortamenti, materiali di consumo, attrezzature, retribuzioni dell'operatore e manutenzione;
- Costo dell'utensile, suddiviso nei due contributi dovuti al costo dell'inserito ed al costo dello stelo porta inserto.

Nello stesso anno viene proposta [Ben-Arieh, 2000] una valutazione economica per lavorazioni ad asportazione di truciolo molto simile a quella appena presentata, con in più alcune piccole integrazioni, ovvero:

- L'aggiunta del costo del materiale da lavorare;
- L'aumento del costo utensile dovuto al contributo di cambio dell'utensile;
- Un supplemento relativo ai costi fissi ed ai costi di set-up.

Come si può notare dagli anni di pubblicazione di questi studi, l'analisi del costo per le operazioni di fresatura, e lavorazioni convenzionali in genere, è alquanto statica da qualche periodo a questa parte. Essa viene riconsiderata in letteratura principalmente al fine di comparare economicamente questa con altre tecnologie di taglio. Non vi sono state però significative evoluzioni e cambiamenti rispetto ai modelli di costo presentati in passato, sebbene vi sia ancora spazio per possibili integrazioni e miglioramenti.

## 2.4 TECNOLOGIA LASER BEAM MACHINING

Per le caratteristiche di processo la tecnologia laser (acronimo inglese di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) è riconducibile alla categoria delle lavorazioni non convenzionali di tipo termico; il processo sfrutta infatti l'interazione tra un fascio di luce coerente e monocromatico con il pezzo da lavorare.

La tecnologia laser detiene un posto di privilegio nell'ambito delle tecnologie non convenzionali, per la molteplicità di applicazioni a cui può essere indirizzata e per gli svariati settori industriali coinvolti. Il laser si inserisce nel panorama industriale come utensile

flessibile: il fascio di luce utilizzato presenta caratteristiche uniche che possono essere controllate ed adattate al settore desiderato, sostituendo anche le macchine utensili nelle tradizionali lavorazioni di taglio, operazione presentata nel presente elaborato.

#### 2.4.1 PRINCIPIO FISICO DI TAGLIO DEL MATERIALE

Il processo tecnologico che sfrutta il laser come utensile della lavorazione dipende essenzialmente dall'interazione tra un fascio di luce monocromatico e coerente, a lunghezza d'onda compresa nel campo dell'ultravioletto ( $0,4 \mu\text{m}$ ) e dell'infrarosso ( $0,8 \mu\text{m}$ ), con il pezzo da lavorare.

Le caratteristiche che distinguono la radiazione elettromagnetica generata da una sorgente laser da quella generata da una comune sorgente luminosa sono le seguenti (figura 2.29):

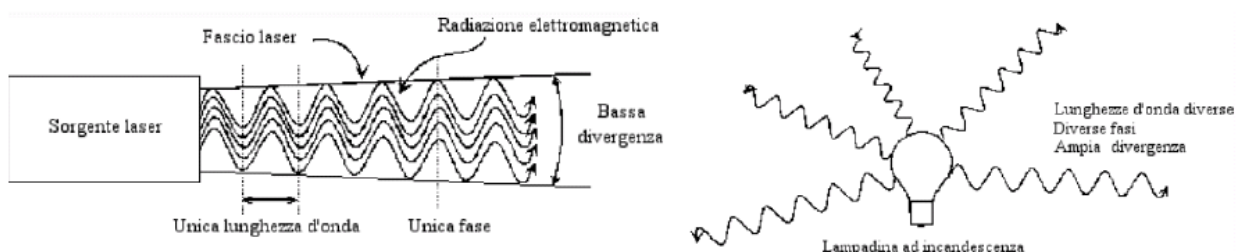


Figura 2.29: Differenze fra sorgente laser e comune sorgente luminosa

- Monocromaticità: le radiazioni elettromagnetiche del fascio laser hanno tutte la stessa lunghezza d'onda  $\lambda$ ;
- Unica Fase: le radiazioni elettromagnetiche hanno tutte la stessa fase (cioè iniziano e terminano al medesimo istante);
- Bassa divergenza: il fascio laser possiede una geometria conica con angolo di divergenza estremamente limitato (dell'ordine dei milliradianti). Si tratta quindi di una radiazione "ordinata", che si differenzia profondamente dalla radiazione dominata dal caos che contraddistingue le tradizionali sorgenti di radiazione elettromagnetica.

Il principio fisico del processo si fonda sul concetto di emissione stimolata di un atomo (schematizzata in figura 2.30) che decadendo da un livello energetico superiore al livello inferiore emette energia sotto forma di fotoni tutti in fase tra loro che andranno a costituire il fascio laser.

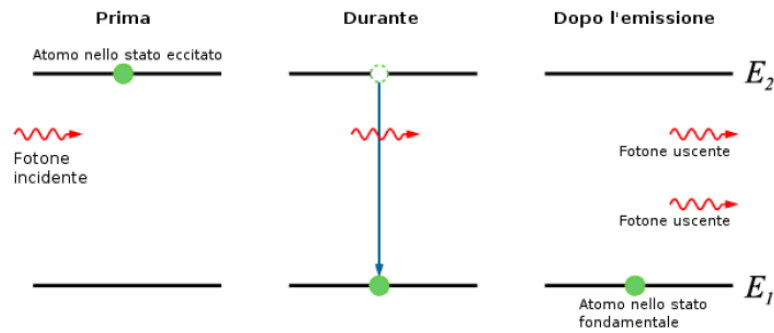


Figura 2.30: Emissione stimolata dell'atomo

Il dispositivo che consente la generazione del fascio è la sorgente laser (figura 2.31), sistema in grado di convertire l'energia elettrica prelevata dalla rete in energia radiante. L'energia prelevata dalla rete elettrica viene pompata in un mezzo (un materiale solido, liquido o gassoso) posto all'interno di una cavità risonante delimitata assialmente da due specchi affacciati. Quando viene pompata energia, il mezzo diventa attivo ed è in grado di generare il fascio laser che fuoriesce dalla cavità attraversando uno specchio semi-riflettente.

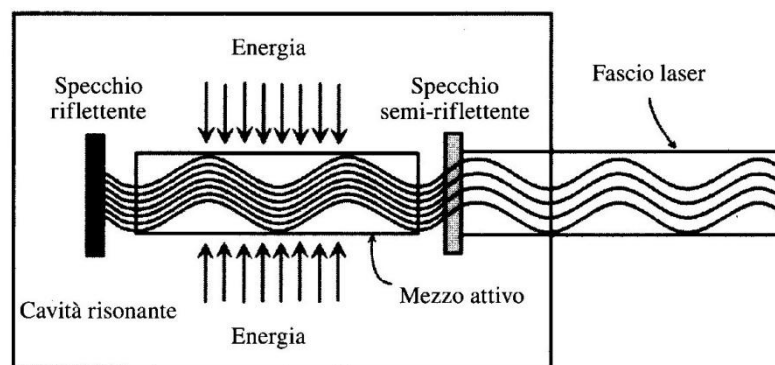


Figura 2.31: Architettura di una sorgente laser [Monno, 2012]

Il mezzo attivo delle sorgenti industriali di potenza, nel caso di taglio di lamiere metalliche, è allo stato gassoso; le due tipologie esistenti sono:

- Laser ad elio - neon (He - Ne) : il mezzo attivo è il neon, mentre l'elio viene utilizzato per aumentare l'efficienza di pompaggio.
- Laser a CO<sub>2</sub> : è costituito da una miscela di gas in cui CO<sub>2</sub> rappresenta il materiale attivo, N<sub>2</sub> trasferisce l'energia al CO<sub>2</sub>, infine He svolge una funzione moderatrice).

Nel taglio per fusione, il più utilizzato nell'industria per materiali metallici, il fascio viene focalizzato sulla superficie del pezzo, mentre viene generato un moto relativo, riscaldando il materiale fino a portarlo a fusione (si necessita di bassi valori di potenza, grandi spot e alte

velocità di avanzamento). Una volta fuso il materiale viene allontanato grazie alla spinta esercitata dal gas di assistenza. Esistono due modalità di taglio per fusione:

- Con gas inerte, dove il gas di assistenza non reagisce chimicamente con il materiale tagliato. E' adatto a materiali metallici per spessori fino a 10 mm e consente di ottenere un'ottima qualità di lavorazione. I gas che vengono utilizzati in tale metodologia, che risulta particolarmente adatta per materiali come acciai inossidabili, zincati e leghe di alluminio, sono principalmente azoto, argon ed elio.
- Assistito ad ossigeno, in cui il gas di assistenza è un gas reattivo (ovvero ossigeno puro o in miscela) che entrando in contatto con un metallo ad alta temperatura, innesca una reazione di ossidazione. In questo caso il ruolo del fascio laser risulta duplice: fondere il materiale e fungere da sistema di ignizione della reazione. Questa seconda metodologia viene utilizzata per materiali ferrosi, come acciaio a basso tenore di carbonio.

La testa di taglio è costituita da due elementi fondamentali (figura 2.32):

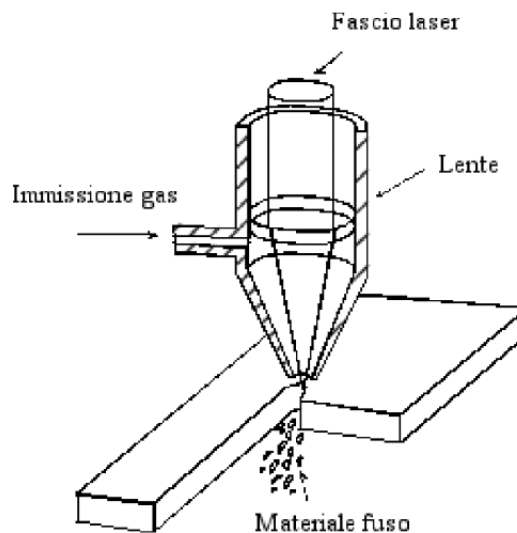


Figura 2.32: Testa di taglio laser [Monno, 2012]

1. Il sistema di focalizzazione, composto da una lente che impedisce al gas di risalire verso l'alto. La geometria conica consente al flusso di gas di fuoriuscire ad elevate velocità in direzione parallela all'asse del fascio laser; il flusso gassoso esercita una spinta fluidodinamica sul materiale fuso dal fascio laser, favorendo l'espulsione di materiale dal solco;
2. L'ugello, di diametro compreso tra 0,3 e 2,5 mm e posto a distanza di circa 1 mm dal pezzo in lavorazione.

La pressione di immissione del gas è compresa tra 0,2 e 2 MPa. I gas emessi hanno il compito di: allontanare il materiale fuso dal solco di taglio, fornire energia alla reazione di ossidazione

a cui concorrono a contatto con il materiale, proteggere la lente da proiezioni di materiale fuso e partecipare al raffreddamento del bordo di taglio per ridurre la zona termicamente alterata.

#### **2.4.2 PARAMETRI DI PROCESSO E LORO INFLUENZA SULLE PRESTAZIONI DI TAGLIO**

L'elevata velocità di taglio, unita all'ottima qualità del lembo generato, sono i principali fattori che hanno decretato il successo e l'ampia diffusione del taglio laser nell'industria, nonostante il costo relativamente elevato dei sistemi laser. Dato che i parametri di processo hanno una profonda influenza su produttività e qualità del taglio, è di fondamentale importanza dominare la lavorazione attraverso la conoscenza proprio della relazione tra i parametri di processo, qualità e produttività, con lo scopo di ottimizzare le condizioni del processo e di giungere a un pieno sfruttamento economico del sistema laser adottato. Per la particolare lavorazione di taglio si selezionano e monitorano i parametri significativi relativi a:

- proprietà del fascio:
  1. Potenza del fascio;
  2. Diametro dell'ugello;
- proprietà di trasporto del fascio:
  3. Velocità di taglio;
  4. Posizione del fuoco;
- proprietà del gas:
  5. Pressione del gas nell'ugello.

##### **2.4.2.1 POTENZA DEL FASCIO**

All'aumentare della potenza, aumentano la velocità di taglio e lo spessore massimo che può essere tagliato. La grandezza però che deve essere considerata per ottenere miglioramenti nel processo di taglio non è tanto la potenza, ma la densità di potenza, parametro che a sua volta dipende dalla potenza della sorgente laser, dalla qualità del fascio e dalla lunghezza focale della lente.

##### **2.4.2.2 DIAMETRO DELL'UGELLO**

All'aumentare dello spessore da tagliare, si preferisce aumentare il diametro dell'ugello, aumentando così la portata di gas.



#### 2.4.2.3 VELOCITA' DI TAGLIO

È funzione dello spessore da tagliare e diminuisce al suo aumentare. A parità di spessore la velocità in caso di taglio assistito ad ossigeno è maggiore rispetto al caso di taglio con gas inerte ma la curva è più inclinata poiché, all'aumentare dello spessore, l'ossigeno raggiunge con difficoltà il fondo del solco e diminuisce l'efficacia della reazione di ossidazione. All'aumentare della potenza, aumentano la velocità di taglio e lo spessore massimo che può essere tagliato (figura 2.33). L'incremento di velocità che si riesce ad ottenere è pressoché lineare con la potenza del fascio.

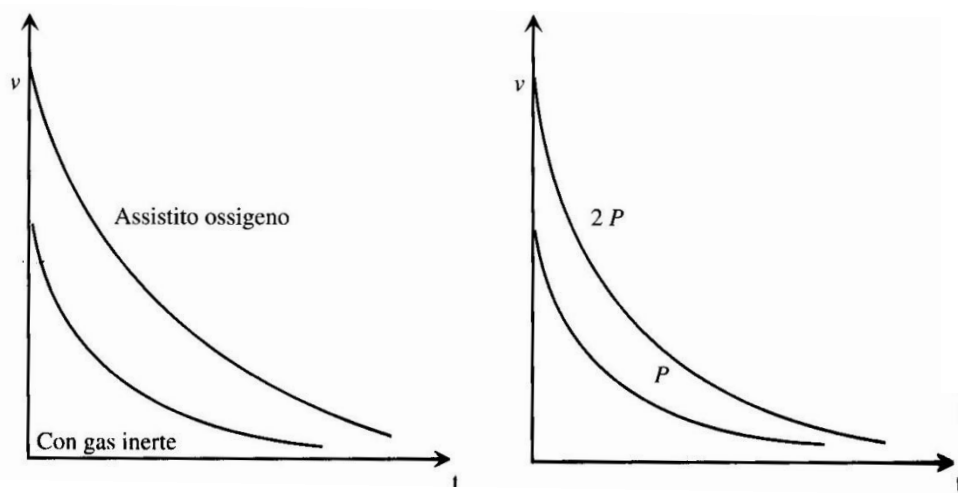


Figura 2.33: Influenza dello spessore del pezzo sulla velocità di taglio e sulla potenza [Monno, 2012]

#### 2.4.2.4 POSIZIONE DEL FUOCO

Per un taglio eseguito con gas inerte la posizione del fuoco è al di sotto della superficie, indicativamente fino a un terzo dello spessore. In questo modo è possibile ottenere una geometria a V della parte superiore del solco, geometria che favorisce l'ingresso del flusso di gas all'interno del solco stesso, aumentando l'efficacia dell'azione di espulsione del materiale fuso.

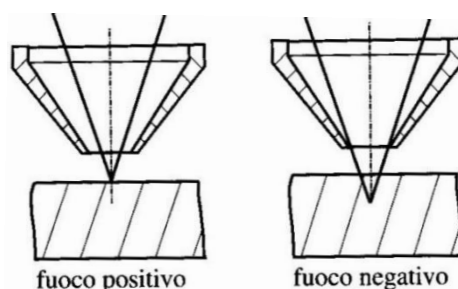


Figura 2.34: Posizione del fuoco: positivo o negativo [Monno, 2012]

Nel caso di taglio assistito ad ossigeno, il fuoco è normalmente posizionato sulla superficie superiore del pezzo, in modo da innalzare la temperatura ed innescare la reazione di ossidazione (figura 2.34).

#### 2.4.2.5 PRESSIONE DEL GAS NELL'UGELLO

Nel caso di taglio per fusione, i gas di assistenza hanno il compito di allontanare il fuso dal solco di taglio: più velocemente il materiale fuso è asportato, minore è il tempo che intercorre per fondere nuovo materiale e quindi procedere nel taglio. Come si osserva da figura 2.35 [Monno, 2012], all'aumentare della pressione dei gas, la velocità di taglio aumenta e, superata una certa soglia nel valore di pressione, tende poi a diminuire.

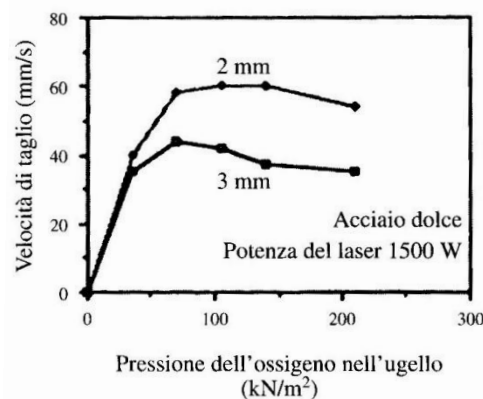


Figura 2.35: Andamento della velocità di avanzamento in funzione della pressione

#### 2.4.3 MODELLO DI PRODUTTIVITA' DEL PROCESSO

Nel caso di taglio laser è possibile determinare il rateo di asportazione del materiale, essendo esso un processo termico, come:

$$MRR = \frac{W(1-r)}{\rho H} \quad [m^3/s]$$

A numeratore:

- $W$  = potenza emessa dalla sorgente laser [W];
- $r$  = indice di riflettività della superficie del materiale, dato dal rapporto:  
 $r = \text{energia riflessa} / \text{energia incidente}$

⇒  $W(1-r)$  risulta quindi essere la potenza assorbita dal pezzo in lavorazione

A denominatore:

- $\rho$  = densità del materiale [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
- $H$ =energia specifica per fondere 1 kg di materiale [ $\text{J}/\text{Kg}$ ], valutabile come:

$$H = C_s (T_f - T_a) + H_f$$

Dove:

- $C_s$  il calore specifico allo stato solido del materiale [ $\text{J}/^\circ\text{C kg}$ ];
- $T_a$  e  $T_f$  rispettivamente le temperature ambiente e di fusione del materiale [ $^\circ\text{C}$ ];
- $H_f$  il calore latente di fusione del materiale [ $\text{J}/\text{kg}$ ].

Valori tipici del rateo di asportazione in caso di taglio laser sono:

$$\text{MRR} \approx 10^3 \text{ mm}^3/\text{min}$$

MRR dipende nella fattispecie dalla potenza della sorgente laser, in particolare aumenta al suo crescere; dipende inoltre dal tipo di materiale tagliato e dalla velocità di avanzamento, ovvero maggiore è la velocità, più alto sarà il MRR, a parità degli altri parametri. Si può da ciò desumere che aumentando la velocità di avanzamento deve aumentare la portata di gas di assistenza per poter tagliare lo stesso spessore; ma anche se aumenta la profondità di taglio aumenta la portata di gas di assistenza; essendo quindi il rateo di asportazione direttamente proporzionale sia alla velocità di avanzamento, sia alla profondità di taglio, come si può notare di seguito:

$$\text{MRR} = V_a p l$$

Dove:

- $V_a$  = velocità di avanzamento;
- $p$  = profondità di taglio;
- $l$  = larghezza del taglio

si conclude che se aumenta il MRR deve aumentare anche la portata di gas di assistenza.

#### 2.4.4 CONSUMO MATERIALI

L'unico materiale di consumo presente in una lavorazione di taglio effettuata con tecnologia laser è il gas di assistenza. La portata di gas deve essere commisurata alla velocità di avanzamento, secondo una proporzione approssimativamente lineare, in quanto minore è la sosta della sorgente laser in un certo punto, maggiore deve essere l'apporto di gas per poter fondere lo stesso quantitativo di materiale.

A parità di altri parametri, la portata di gas dipende anche dalla tipologia stessa del gas di assistenza (per tagli al  $\text{CO}_2$  si necessitano portate molto inferiori rispetto a lavorazioni al He);

il suddetto parametro è inoltre funzione dello spessore da tagliare e, come già analizzato, del tasso di rimozione del materiale.

#### 2.4.5 CONSUMO ENERGETICO

Il consumo energetico durante una lavorazione laser è dovuto in parte alla macchina ed ai suoi spostamenti, in parte alla sorgente laser. Viene in questo elaborato trascurato il contributo di consumo energetico dovuto al pompaggio del gas di assistenza, in quanto si assume per ipotesi che il gas venga contenuto in bombole in pressione.

La parte di consumo dovuto alla macchina dipende dalle condizioni di lavoro della macchina stessa, sostanzialmente diverse in dipendenza sia della pianificazione produttiva sia dell'efficienza dell'apparecchiatura secondaria dello specifico stabilimento in cui la macchina è installata. In particolare, le operazioni che dovrebbero essere eseguite dalla e sulla macchina sono essenzialmente tre:

- 1 . Lavorazione del pezzo;
- 2 . Attesa del pezzo;
- 3 . Realizzazione di attività di manutenzione (programmate o inaspettate).

Per ciascuno di essi, è previsto un diverso fabbisogno di energia elettrica e questo è il motivo per cui deve essere fornita una distinzione precisa e classificazione di queste condizioni di funzionamento in modo da trovare in seguito il rapporto diretto tra il consumo energetico e il suo costo. Per rispondere a questa necessità, sono stati individuati i seguenti stati della macchina :

- 1 . Stato di processo (*process*);
- 2 . Stato di inattività (*idle*);
- 3 . Stato di ibernazione (*hibernation*).

Il primo è di nuovo il tempo cumulativo in cui la macchina lavora un singolo pezzo, ed è quindi esprimibile in funzione del tempo di processazione del pezzo e del numero di pezzi prodotti all'anno. Lo stato di inattività è il tempo globale in cui la macchina è in funzione, ma il pezzo non viene lavorato, indipendentemente da un eventuale arresto imprevisto del sistema produttivo o semplicemente a causa del tempo richiesto per cambiare il pezzo. Lo stato di ibernazione, infine, è quello caratterizzato dalla completa inattività della macchina utensile, che risulta semplicemente accesa con consumo nullo di energia. In conclusione, l'effettiva spesa energetica della macchina può essere derivata dalla quantificazione dei diversi tempi impiegati dalla macchina stessa nelle sue tre possibili condizioni operative.

Il consumo energetico legato agli spostamenti dipende dalla lunghezza del taglio, quindi dalla forma del taglio stesso, ma anche dalle forze di attrito e dalle forze di inerzia dovute ad accelerazioni e decelerazioni che la macchina incontra nel movimentare la testa di taglio.

La parte di consumo energetico dovuto alla sorgente laser, necessaria per l'ottenimento del fascio, è dovuta sia al tempo attivo di lavorazione sia alla potenza della sorgente stessa.

#### 2.4.6 CONSIDERAZIONI SULLA QUALITÀ DEL TAGLIO

La tipica geometria del solco ottenuto con il taglio laser si discosta dalla geometria ideale caratterizzata da lembi piani e normali alla superficie superiore; in questo caso infatti le pareti sono convergenti, ondulate ed in molti casi striate (figura 2.36).

Per valutare la qualità in termini dimensionali di un lembo tagliato, è possibile adottare la normativa DIN 2310 che definisce ed impone criteri di indagine per qualificare più aspetti:

- inclinazione delle pareti laterali;
- finitura superficiale delle stesse;
- zona termicamente alterata (ZTA);
- presenza di bava.

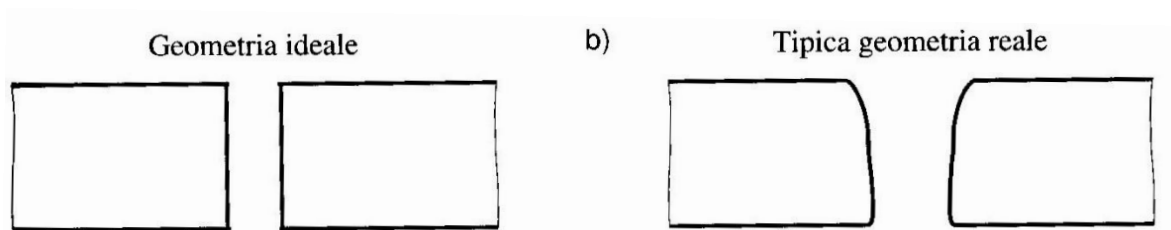


Figura 2.36: Geometria ideale e geometria reale dei lembi tagliati [Monno, 2012]

L'inclinazione delle pareti è valutata misurando parallelamente alla superficie superiore la distanza  $C$  tra due punti che giacciono sulla superficie generata posti ad una distanza  $\Delta t$  dalla superficie superiore alla superficie inferiore della lamiera (figura 2.37).

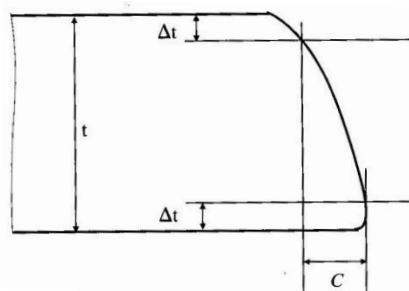


Figura 2.37: Modalità di misurazione dell'inclinazione delle pareti di taglio [Monno, 2012]

Una volta misurato il valore di C, occorre identificare il campo di qualità (figura 2.38) nel quale ricade il taglio effettuato in relazione allo spessore t della lamiera [Monno, 2012]:

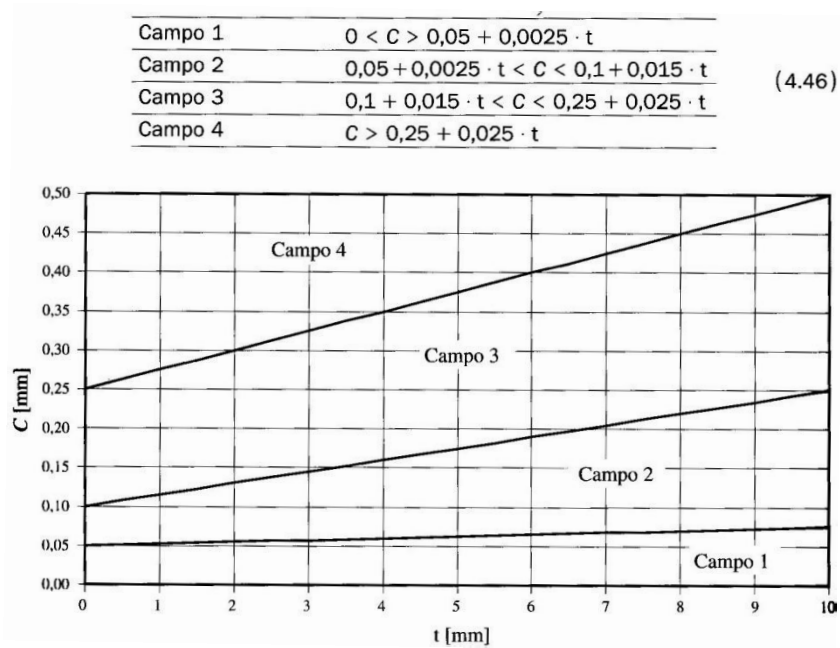


Figura 2.38: Definizione dei campi di qualità per l'inclinazione delle pareti del solco

La finitura superficiale è valutata tramite la rugosità  $R_z$  che rappresenta la media aritmetica tra il picco minimo di valle e il massimo picco valutati all'interno dei cinque tratti di base del profilo di rugosità. In base alla normativa, la misura di finitura deve essere fatta a 2/3 dal bordo dello spessore (figura 2.39).

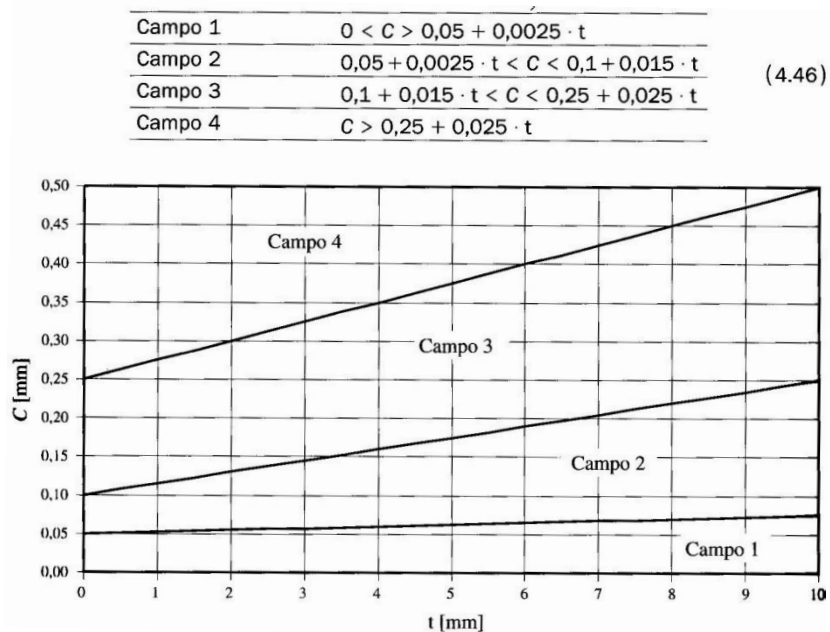


Figura 2.39: Definizione dei campi di qualità per la rugosità superficiale

Valori tipici della rugosità in caso di taglio laser sono di  $R_a \approx 10 \mu\text{m}$ .

Con il termine Zona Termicamente Alterata si indica la zona prossima al lembo generato che ha subito, durante il taglio, un'alterazione microstrutturale a causa del ciclo termico. Il materiale nella ZTA pur non avendo raggiunto la temperatura di fusione durante il taglio, ha subito una variazione strutturale e presenta caratteristiche meccaniche peggiori rispetto al materiale base. Dato che la trasmissione del calore richiede tempo per avvenire, maggiore è la velocità di taglio e minore è l'estensione della ZTA.

Infine, per ciò che riguarda la presenza di bava, nel taglio per fusione essa si forma sullo spigolo inferiore a seguito della repentina solidificazione del materiale fuso che abbandona il solco, grazie alla sua elevata conducibilità termica. Nel caso di taglio con gas inerte l'estensione della bava è tanto maggiore quanto maggiori sono la tensione superficiale e la viscosità del materiale liquido (figura 2.40). Il modo più efficace per eliminare il problema consiste nell'aumento della pressione del gas, aumentando così la spinta sul liquido e favorendo quindi la completa evacuazione del fuso.

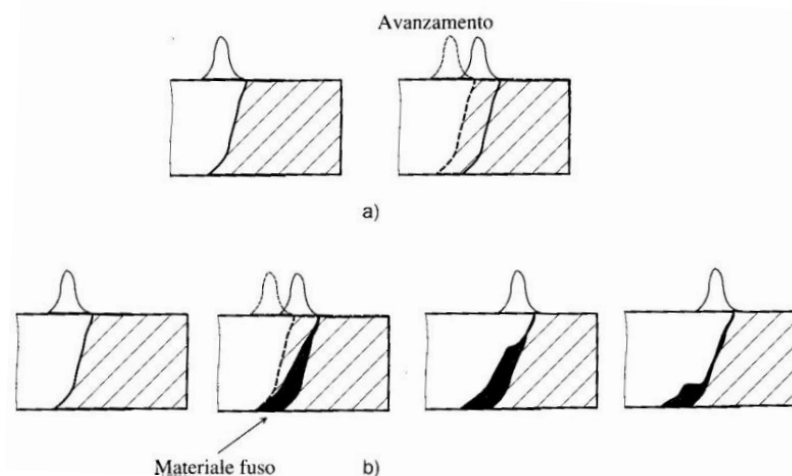


Figura 2.40: Meccanismo di formazione delle striature laterali nel taglio con gas inerte  
[Monno, 2012]

Nel taglio assistito con ossigeno, illustrato in figura 2.41, la bava è invece costituita da ossido metallico, molto fragile che può essere semplicemente rimosso con una spazzola metallica.

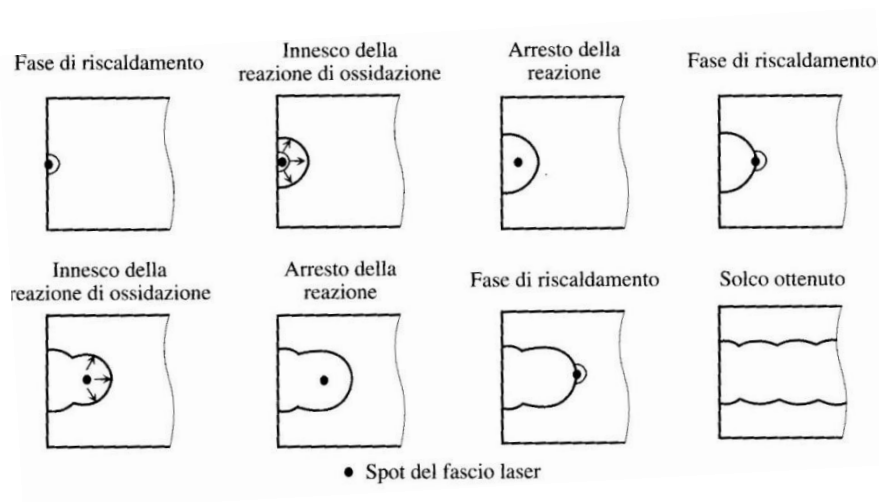


Figura 2.41: Meccanismo di formazione delle striature laterali nel taglio laser assistito ossigeno [Monno, 2012]

#### 2.4.7 MODELLI ESISTENTI PER IL CALCOLO DEL COSTO TOTALE

Il tentativo di stimare il costo di taglio nell'utilizzo della tecnologia laser è stato fino ad ora oggetto di vari studi. Le voci di costo che vengono considerate nella stima economica totale per operazioni di taglio nei modelli riscontrati in letteratura [Verma, Bao, Nagarathanm, 2002], sono:

- Costi di set-up e manutenzione, proporzionali al tempo necessario e calcolati in base al costo della manodopera;
- Costo del sistema refrigerante, nullo solo nel caso di laser allo stato solido;
- Costo delle lenti, da sostituire una volta consumate;
- Costo dell'energia, la principale componente di costo dati gli alti consumi ed i bassi rendimenti delle sorgenti laser;
- Costo del materiale laser, solido o gassoso da sostituire periodicamente;
- Costo di manodopera.

Non viene espressamente considerato nel presente modello di costo il contributo dovuto al recupero dell'investimento, in cui per investimento si intende l'ammontare iniziale del costo del macchinario comprensivo di testa laser. Tale componente viene trascurata in quanto considerata un elemento separato nell'analisi dei costi e tradizionalmente non conteggiata come parte del costo di lavorazione.

In modelli antecedenti [Zheng, Han, Chen, Yeo, 1996] venivano imputati per il calcolo della spesa oraria i soli costi imputabili alla manutenzione della macchina ed al consumo di gas di assistenza ed energia. Ci permette questo di concludere che gli studi in materia abbiano



progredito molto, ma, ad ogni modo, esiste ancora molto spazio per colmare lacune e migliorare le attuali analisi dei costi riscontrabili in letteratura.

## 2.5 LIMITI DEGLI ATTUALI MODELLI DI COSTO

Sebbene le metodologie sviluppate al fine di predire il costo di lavorazione per le precedentemente analizzate tecnologie di taglio siano molte e varie, è possibile evidenziare e riconoscere alcune criticità e carenze nei suddetti modelli.

Per quanto riguarda il costo dell'energia, è stata illustrata e analizzata la relazione esistente tra il consumo energetico e la potenza dell'intensificatore, o del generatore di tensione o ancora della sorgente laser rispettivamente nei casi di taglio AWJ, WEDM e LBM ma mai del macchinario che permette di eseguire la lavorazione. Una parte del consumo energetico per queste tre lavorazioni è infatti dovuta anche all'energia assorbita dalla macchina a controllo numerico nei suoi tre stati di funzionamento, ovvero:

- 1 . Stato di processo (*process*);
- 2 . Stato di inattività (*idle*);
- 3 . Stato di ibernazione (*hybernation*).

Nel primo e secondo caso si può ipotizzare un consumo dovuto a controllo numerico, ventilazione e guide di assi e mandrino con la differenza di assorbimenti più alti durante la lavorazione; nel terzo caso si suppone una totale inattività della macchina e quindi un consumo energetico nullo.

Sempre per quanto concerne il costo dell'energia, sarebbe opportuno anche per il caso di fresatura suddividere gli assorbimenti di potenza dei vari componenti costituenti la macchina fresatrice. In particolare, lavorando anch'essa nei tre stati di funzionamento riportati, si può supporre un consumo dovuto a controllo numerico, ventilazione e guide di assi e mandrino nei primi due casi, con la differenza di assorbimenti più alti durante la lavorazione, aggiungendo inoltre nello stato di processo il contributo di consumo dovuto alla potenza del taglio, in quanto nella fresatura, a differenza delle altre tre operazioni, si ha contatto diretto tra pezzo ed utensile. Per lo stato di ibernazione si suppone anche in fresatura una totale inattività della macchina e quindi un consumo energetico nullo.

Un ulteriore fattore critico è che la maggior parte degli approcci risulta finalizzata a valutare i soli costi variabili di una lavorazione, ovvero la componente di costo totale dipendente dal volume di produzione. In pochi casi vengono citati i costi fissi, denotati come "altri costi annuali", e mai esplicitati ed analizzati per capire quale sia la causa che li generi. Sarebbe opportuno invece nell'analisi dei costi, accanto ai variabili, studiare anche la componente

fissa dato che risulta essere una componente differenziale nella comparazione di tecniche alternative di lavorazione, sebbene indipendente dal volume produttivo.

Un altro aspetto che non viene considerato è il recupero dell'investimento iniziale che andrebbe invece considerato nella stima del costo come ammortamento. L'ammortamento è un conto di addebito che provvede al recupero del capitale che è servito per l'acquisto di un bene fisico e consiste nell'accantonamento ogni anno di una somma di denaro per tutto il periodo di recupero dell'investimento; in questo caso l'ammortamento riguarda quindi macchine a controllo numerico, sistema di intensificazione di pressione, generatore di tensione e sorgente laser. I macchinari e le attrezzature appena citate hanno in genere un periodo di recupero pari a cinque anni.

Infine, la principale carenza in letteratura riguardo ai modelli economici riscontrati, risulta essere la mancanza di un'omogeneità apprezzabile tra i diversi metodi di quantificazione del costo. L'assenza di informazioni precise relative ad alcune componenti dei modelli porta a trascurare il relativo contributo e si riflette così nell'impossibilità di ottenere risultati validi da poter porre a confronto. Sarebbe opportuno giungere dunque alla definizione di un modello di costo per ogni lavorazione che presenti analogia, uniformità e compattezza rispetto agli altri, per poter effettuare la comparazione economica.

### 3. Definizione dei modelli di costo

---

L'ottimizzazione dei processi rappresenta il requisito principale della produzione industriale moderna. Un processo può essere definito ottimale se massimizza i profitti soddisfacendo contemporaneamente le aspettative del committente in termini di qualità del prodotto ottenuto, nonché i vincoli tecnologici e organizzativi dell'azienda.

E' necessario quindi concentrarsi sull'analisi tecnologica di ogni processo, ovvero sull'influenza dei principali parametri della lavorazione nel calcolo dei costi del pezzo finale da ottenere. Avendo precedentemente selezionato per ciascuna lavorazione gli input tecnologici di interesse, risulta ora indispensabile individuare i modelli descrittivi delle relative funzioni di costo.

#### 3.1 DESCRIZIONE GENERALE DEL MODELLO DI COSTO

I costi rappresentano uno degli aspetti più importanti che ogni azienda deve considerare nel momento in cui decide di pianificare il processo di fabbricazione di un determinato manufatto. Solitamente deve essere stabilito preliminarmente un *cost driver*, ovvero un fattore che permetta di suddividere i costi in:

- FISSI
- VARIABILI

Il *cost driver* più utilizzato è il volume di produzione.

Il costo totale di fabbricazione  $C$  può dunque essere espresso come somma dei due contributi:

$$C = C_v n + C_f \quad [€]$$

Dove  $n$  rappresenta il numero totale di componenti da produrre.

I costi fissi  $C_f$  sono tutte quelle spese che non variano al variare delle quantità prodotte, ovvero sono quei costi che devono essere necessariamente sostenuti indipendentemente dal numero di componenti da produrre. Questi possono essere calcolati allo stesso modo per tutte le quattro lavorazioni in quanto sono i costi sostenuti per programmare la macchina utilizzata per lo specifico processo e per eseguirne il setup, quindi:

$$C_f = C_{op} T_p + C_{os} T_s \quad [€]$$

Dove:

- $C_{op}$  = costo orario di programmazione [€/h];
- $C_{os}$  = costo orario di setup [€/h];
- $T_p$  = tempo necessario a programmare la macchina [h];
- $T_s$  = tempo impiegato per eseguirne il setup [h].

I costi variabili, al contrario, sono tutti quei costi che variano in relazione al volume di produzione, in particolare saranno tanto maggiori quanto più è elevato il numero di componenti da produrre. Essi sono costituiti da contributi diversi a seconda della tecnologia di taglio utilizzata; devono pertanto essere analizzati separatamente.

### 3.1.1 RACCOLTA DATI

La raccolta dei dati è un processo chiave in ogni ambito; la congruenza e la veridicità del risultato dipendono infatti fortemente dalla disponibilità e dall'affidabilità dei dati stessi. Di fondamentale importanza risulta essere in particolare anche la loro coerenza, intesa come pertinenza all'ambito di applicazione; per questo motivo è necessario individuare per ciascuna tecnologia analizzata le fonti di dati che risultano essere le più adatte. Al fine infatti di valutare l'efficienza dell'algoritmo che verrà sviluppato e la correttezza dei risultati poi restituiti, è stata effettuata una raccolta di dati, da utilizzare come input per il software. Non si considera la totalità delle applicazioni, ma solo casi riguardanti il taglio di lamiere metalliche, provenienti sia da fonti scientifiche che applicative industriali.

Per ciò che riguarda i dati comuni a tutte le tecnologie, è possibile ricavare da diverse fonti [Zheng, Han, Chen, Yeo, 1996], [Seo, Ramulu, Hashish, 2005], [Holmqvist e Honsberg, 2008], [Hashish, 2009], [Klocke, Zeis, Klink, Veselovac, 2013] dei *range* di valori per ogni parametro, ovvero valori minimi e massimi in cui è possibile riscontrare ciascuno di essi in letteratura, come riassume la seguente tabella 3.1:

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Tempo di vita macchinario in ore	18.000	30.000
Utilizzo annuo del macchinario in ore	1.600	2.500
Costo dell'elettricità in €/kWh	0,075	0,5
Durata dell'investimento in anni	5	10
Tasso di interesse dell'investimento	3%	7%
Costo dell'operatore in €/h	15	30
Spessore della lamiera in mm	1	10
Extracorsa in mm	1	10
Tempo di carico pezzo in h	0,03	0,05
Tempo di scarico pezzo in h	0,03	0,05
Tempo di avvicinamento al pezzo in h	0,002	0,005
Tempo di allontanamento in h	0,002	0,005
Tempi di programmazione in h	2	24
Costi orari di set up in €	30	40
Costi orari di programmazione in €	30	40

Tabella 3.1: Parametri comuni e loro valori

Tra i dati di interesse per il raggiungimento dello scopo finale, inteso come il confronto fra le varie tecnologie di taglio, si presentano anche quelli relativi al materiale costituente il pezzo in lavorazione. A tal fine ne sono stati selezionati quattro, perché rappresentino i materiali metallici maggiormente utilizzati nell' odierna industria per lamiere ad uso di costruzione meccanica, ovvero leghe di alluminio, acciai e ottoni:

- Peraluman 5754: lega alluminio-magnesio;
- 34CrNiMo6: acciaio debolmente legato;
- X6Cr17: acciaio fortemente legato;
- CuZn39Pb3: ottone (lega rame-zinco).

Per ciascuno di essi sono stati individuati i valori dei parametri dalle rispettive schede tecniche fornite da [Metallurgia Veneta] e [Lucefin Group], ad esclusione di "calore specifico allo stato liquido" e "calore latente di vaporizzazione", dati troppo specifici e non reperibili in letteratura. Di conseguenza i valori sopra riportati sono stati calcolati per il presente lavoro esattamente come segue:

- Calore specifico allo stato liquido: per ogni materiale è stato approssimato un andamento lineare del calore specifico in funzione della temperatura, a causa, come detto, della scarsità di dati; avendo a disposizione i valori del parametro per diverse temperature [Manuali Cremonese, 1982] è stato possibile tracciarne la retta e calcolare il valore della funzione per la temperatura intermedia tra il punto di fusione ed il punto di vaporizzazione, ovvero per una temperatura in cui il materiale si trovasse allo stato liquido. Nel caso della lega di alluminio, per esempio, si hanno come dati:

Calore specifico a 0 °C = 879 J / kg °C  
 Calore specifico a 100 °C = 944 J / kg °C  
 Calore specifico a 500 °C = 1205 J / kg °C

Si calcola quindi la temperatura intermedia tra quella di vaporizzazione e quella di fusione come:

$$T_i = \frac{T_f + T_v}{2} = 1590 \text{ °C}$$

Alla quale corrisponde un calore specifico pari a 1860 J/kg°C, come visibile dal seguente grafico 3.1:

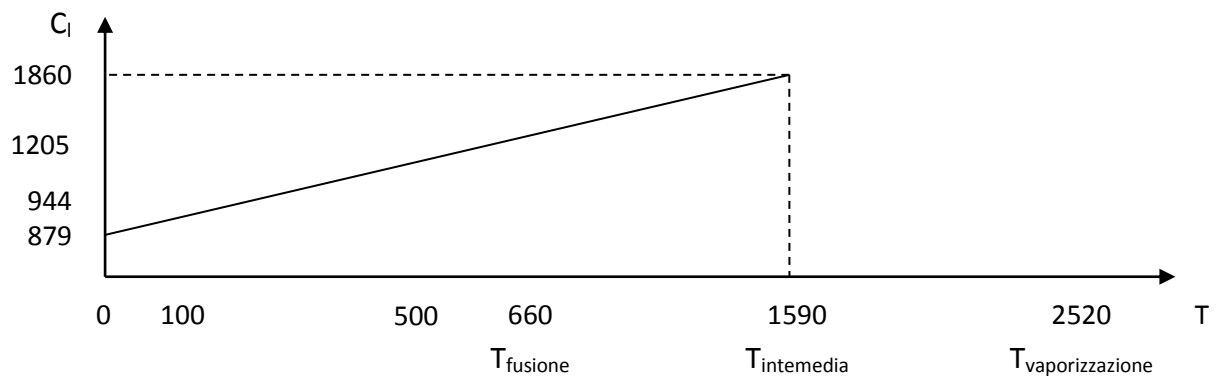


Figura 3.1: Andamento del calore specifico in funzione della temperatura per Peraluman

- Calore latente di vaporizzazione: per ogni materiale è stato ricavato il suddetto parametro secondo il calcolo proposto in [Mastronardi, 2013] e sotto riportato:

$$H_v = T_f 100 \text{ J / mol K}$$

Ovvero il calore latente di vaporizzazione viene assunto come funzione della temperatura di fusione (espresso in Kelvin nella precedente formula). Ad esempio nel caso dell'ottone si ha:

$$H_v = 1536 \times 100 \times 1000 / 65 = 2 \times 10^6 \text{ [J/kg]}$$

In cui 1536 è la temperatura di fusione [K] dell'ottone, 1000 è il convertitore per passare da grammi a kilogrammi mentre 65 è il peso molecolare [g/mol] del materiale.

Si riportano le caratteristiche di interesse per il presente lavoro dei materiali suddetti nella tabella 3.2 sottostante:

MATERIALE	Peraluman 5754	34CrNiMo6	X6Cr17	CuZn39Pb3
PARAMETRO				
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	2.650	7.870	7.900	8.400
Modulo Young [N/mm <sup>2</sup> ]	70.000	210.000	200.000	91.000
Indice di riflettività	0,73	0,65	0,65	0,90
Temperatura di fusione [°C]	660	1.530	1.460	930
Temperatura di vaporizzazione [°C]	2.520	2.750	2.630	2.560
Calore latente di fusione [J/kg]	270.300	240.000	240.000	210.000
Calore latente di vaporizzazione [J/kg]	3,5x10 <sup>6</sup>	3x10 <sup>6</sup>	3x10 <sup>6</sup>	2x10 <sup>6</sup>
Calore specifico allo stato solido [J/kg*°C]	890	460	460	380
Calore specifico allo stato liquido [J/kg*°C]	1.870	1.420	1.790	660
Pressione specifica di taglio [N/mm <sup>2</sup> ]	400	2.700	3.100	600

Tabella 3.2: Materiali e relative proprietà

Rimangono infine da considerare i dati relativi consumo energetico di ogni macchinario necessario a ciascuna lavorazione, fresatrice compresa. Come illustrato dal seguente grafico (figura 3.2) è possibile per ogni macchinario scomporre l'assorbimento energetico in diversi contributi [Gontarz, Züst, Weiss, Wegener, 2013]:

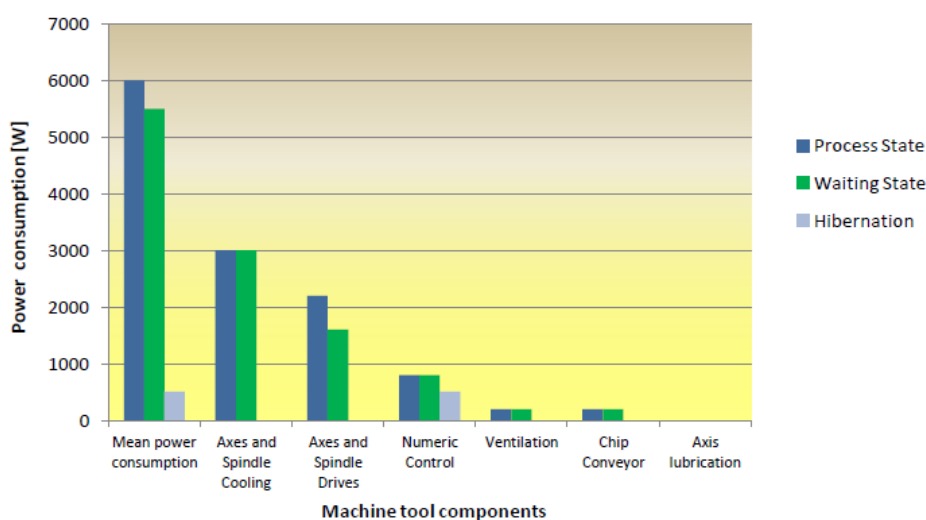


Figura 3.2: Contributi di consumo energetico per diversi stati della macchina

I valori [W] desunti, trascurando come precedentemente detto lo stato di ibernazione, vengono riassunti per la fresatrice in tabella 3.3:

<b>ASSORBIMENTO DI POTENZA DOVUTO A:</b>	<b>VALORE</b>
Controllo numerico nello stato stand by	800
Controllo numerico in lavorazione	800
Ventilazione in standby	200
Ventilazione in lavorazione	200
Guide nello stato standby	1500
Guide in lavorazione	2200
Evacuazione trucioli in standby	200
Evacuazione trucioli in lavorazione	200

Tabella 3.3: Assorbimenti di potenza per la fresatrice

Infine per i macchinari necessari alla lavorazione in caso di taglio idroabrasivo, elettroerosivo o con fascio laser, i valori sono di seguito riportati (tabella 3.4):

<b>ASSORBIMENTO DI POTENZA DOVUTO A:</b>	<b>VALORE</b>
Controllo numerico nello stato stand by	800
Controllo numerico in lavorazione	800
Ventilazione in standby	200
Ventilazione in lavorazione	200
Guide nello stato standby	1500
Guide in lavorazione	2200

Tabella 3.4: Assorbimenti di potenza per i restanti macchinari



### 3.2 TECNOLOGIA AWJ - Formule matematiche e completamento del modello con impostazione finale

I costi variabili per una lavorazione di taglio idroabrasivo possono essere individuati nei seguenti:

- Costo del sistema di intensificazione della pressione
- Costo della macchina per attuare il processo
- Costo della manodopera
- Costo dell'energia consumata nel processo
- Costo dell'ugello
- Costo dell'abrasivo
- Costo dell'acqua
- Spese generali

#### 3.2.1 COSTO DEL SISTEMA DI INTENSIFICAZIONE DELLA PRESSIONE

Il costo del sistema di intensificazione della pressione è quella parte di costo totale del dispositivo che può essere assegnata a ciascun pezzo realizzato. L'ammontare di questa quota dipende dal tempo che l'intensificatore dedica alla lavorazione di quel componente ed, ipotizzando che il dispositivo sia esclusivamente dedicato alla macchina di taglio in questione, viene valutato come:

$$C_{ip} = C_{ipo} T_{ff} \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $C_{ipo}$  = costo orario del sistema di intensificazione [€/h];
- $T_{ff}$  = è il tempo floor-to-floor [h], letteralmente da pavimento a pavimento, ovvero il tempo che comprende non solo la lavorazione del pezzo, ma anche il suo caricamento e scaricamento sul macchinario, ed è dato da:

$$T_{ff} = T_c + T_l + T_s \quad [h/pezzo]$$

Dove:

- $T_c$  = tempo di caricamento del pezzo [h/pezzo];
- $T_l$  = tempo di lavorazione del pezzo [h/pezzo];
- $T_s$  = tempo di scaricamento del pezzo [h/pezzo].

Il tempo di lavorazione è a sua volta calcolabile come somma di tre contributi:

$$T_l = T_{avv} + T_a + T_{all} \quad [h/pezzo]$$

Dove:

- $T_{avv}$  = tempo di avvicinamento della testa di taglio al pezzo [h/pezzo];
- $T_a$  = tempo attivo di lavorazione per effettuare il processo di taglio [h/pezzo];
- $T_{all}$  = tempo di allontanamento della testa di taglio dal pezzo [h/pezzo].

Nel processo di taglio, il tempo attivo di lavorazione è valutabile come:

$$T_a = (L + 2e) / V_a \quad [\text{h/pezzo}]$$

Dove:

- $L$  = lunghezza del taglio [mm];
- $e$  = extracorsa prevista all'inizio ed alla fine del taglio [mm], qua ipotizzata identica sia in caso di taglio aperto che chiuso;
- $V_a$  = velocità di avanzamento [mm/s], la quale deve essere scelta in funzione del rateo di asportazione del processo, ovvero:

$$V_a = \text{MRR} / a \cdot s$$

Essendo  $a$  l'ampiezza del taglio ed  $s$  lo spessore da tagliare, ambedue in mm.

La precedente espressione può quindi essere riscritta come:

$$T_a = (L + 2e) a \cdot s / (3600 \text{ MRR}) \quad [\text{h/pezzo}]$$

In cui 3600 sono i secondi in un'ora, termine inserito per poter passare da secondi (unità di misura presente nel MRR) alle ore (unità di misura del tempo attivo di lavorazione). Viene infatti ricordato che nel caso di lavorazione idroabrasiva, il rateo di asportazione è calcolabile come (rif. Par. 2.1.3):

$$\text{MRR} = 10^9 \eta \frac{\frac{1}{2} (R m^{\circ}_w) \left( \frac{1}{1+R} \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \right)^2}{E_s} \quad [\text{mm}^3/\text{s}]$$

Il costo orario del sistema di intensificazione della pressione viene valutato tramite la seguente espressione:

$$C_{ipo} = (C_{ipamnt} + C_{maip}) / T_{vip}$$

Dove:

- $C_{maip}$  = costo necessario manutenzione nell'arco della vita operativa [€];
- $T_{vip}$  = vita operativa residua stimata del sistema [h];
- $C_{ipamnt}$  = costo del sistema di intensificazione della pressione ammortato all'anno corrente  $t$  [€], dato da:

$$C_{ipamnt} = C_{ipn} - t q$$

In cui:

- $q$  = quota di ammortamento = quota  $c$ /capitale + quota  $c$ /interessi

Avendo supposto la quota di ammortamento costante ed avendola ricavata da:

$$C_{ipn} = \sum_{i=0}^n \frac{q}{(1+r)^i}$$

Ovvero:

$$q = \frac{C_{ipn}}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i}}$$

Dati  $C_{ipn}$  e  $n$ , corrispondenti rispettivamente al costo dell'intensificatore di pressione nuovo [€] e alla durata dell'investimento [anni], esattamente pari alla durata del macchinario.

Il calcolo appena effettuato al fine di determinare il costo del sistema all'anno corrente rimane valido per ogni macchinario trattato nel seguente elaborato, compresi generatore di tensione per il caso WEDM, fresatrice per il caso MILLING e sorgente laser per il caso LBM.

Il costo del sistema di intensificazione della pressione viene considerato funzione della potenza della pompa, secondo una relazione lineare:

$$C_{ipn} = C_{w0} + C_w W$$

Dove:

- $C_{w0}$  = termine noto di costo [€];
- $C_w$  = costo in € per Watt di potenza della pompa [€/W];
- $W$  = potenza della pompa [W], calcolabile come:

$$W = Q_w p / \eta$$

In cui:

- $Q_w$  = portata di acqua [m<sup>3</sup>/s];
- $p$  = pressione dell'acqua [Pa];
- $\eta$  = rendimento complessivo dell'intensificatore di pressione.

Il costo di manutenzione può invece essere stimato come una percentuale del costo della macchina nuova:

$$C_{maip} = \eta_{ma} C_{ipn}$$

### 3.2.2 COSTO DELLA MACCHINA

Il costo della macchina necessaria per attuare il processo di taglio è quella parte del costo totale della macchina che può essere assegnato a ciascun pezzo realizzato. Tale quota dipende dal tempo che la macchina stessa dedica alla lavorazione di quel componente e viene valutato come:

$$C_m = C_{mo} T_{ff} \quad [\text{€/pezzo}]$$

In cui  $C_{mo}$  è il costo orario della macchina [€/h], valutabile come:

$$C_{mo} = (C_{mammt} + C_{mam}) / T_{vm}$$

Essendo  $C_{mammt}$  il costo della macchina ammortata all'anno corrente  $t$  [€],  $C_{mam}$  il costo necessario alla sua manutenzione [€] e  $T_{vm}$  la sua vita operativa residua [h].

### 3.2.3 COSTO DELLA MANODOPERA

Il costo della manodopera, o costo del lavoro, rappresenta il costo del personale direttamente impegnato per la fabbricazione del componente. Ipotizzando che una persona sia impegnata per le sole operazioni di carico e scarico, mentre per il restante tempo di lavorazione sia coinvolto in altre operazioni riguardanti altri processi, si può considerare:

$$C_l = C_{lo} (T_c + T_s) \quad [\text{€/pezzo}]$$

Dove  $C_{lo}$  è il costo orario della manodopera [€/h].

### 3.2.4 COSTO DELL'ENERGIA CONSUMATA

Il costo dell'energia consumata nel processo è dovuto in parte all'assorbimento energetico del sistema di intensificazione della pressione ed in parte a quello del macchinario necessario per svolgere il processo.

La porzione di costo imputabile al sistema di intensificazione è calcolabile come:

$$C_{eip} = W T_a C_{kwh} / 1000 \quad [\text{€/pezzo}]$$

Essendo  $C_{kwh}$  il costo orario del chilowattora e 1000 il convertitore per passare da kW a W, unità di misura con cui è espressa la potenza della pompa.

Il costo del consumo energetico della macchina è invece calcolabile attraverso la seguente espressione:

$$C_{em} = C_{kwh} [e_{cn} (T_c + T_s) + e_v (T_c + T_s) + e_{gs} (T_c + T_s) + e_{cn} T_l + e_v T_l + e_{gp} T_l] / 1000 \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $e_{cn}$  = consumo energetico del controllo numerico negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];
- $e_v$  = consumo energetico della ventilazione negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];
- $e_{gs}$  = consumo energetico delle guide nello stato *stand-by* della macchina [W];
- $e_{gp}$  = consumo energetico delle guide nello stato *process* della macchina [W].

### 3.2.5 COSTO DELL'UGELLO

Il costo dell'ugello è composto dai contributi costo relativi sia all'ugello primario, sia all'ugello focalizzatore ed è valutabile come:

$$C_u = C_{un} T_a / T_{un} + C_{fn} T_a / T_{fn} \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $C_{un}$  = costo ugello nuovo [€/ugello];
- $C_{fn}$  = costo focalizzatore nuovo [€/focalizzatore];
- $T_{un}$  = durata ugello [h];
- $T_{fn}$  = durata focalizzatore [h];

### 3.2.6 COSTO DELL'ABRASIVO

Il costo dell'abrasivo dipende non solo dal suo costo unitario, bensì anche dal costo di smaltimento dello stesso, smaltimento che si rende necessario quando non sia più possibile riutilizzare l'abrasivo. Nella scelta dell'impianto risulta infatti fondamentale la capacità di recupero dell'abrasivo, intesa come capacità del sistema di asciugare l'abrasivo già utilizzato in precedenti operazioni di taglio e poterlo riciclare per nuove lavorazioni. Il costo dell'abrasivo risulta allora essere:

$$C_a = (C_{au} + c_s) Q_a \rho_a T_l / n_r \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $Q_a$  = portata di abrasivo [ $m^3/h$ ];
- $\rho_a$  = densità dell'abrasivo [ $kg/m^3$ ];
- $C_{au}$  = costo unitario dell'abrasivo [€/kg];
- $n_r$  = numero di volte in cui l'abrasivo viene riutilizzato;

- $c_s$  = costo unitario di smaltimento [€/kg];

### 3.2.7 COSTO DELL'ACQUA

Nel caso della tecnologia water jet, l'acqua utilizzata può subire diversi trattamenti: dal semplice filtraggio, alla demineralizzazione mediante resine a scambio ionico, alla osmosi inversa. In ragione delle scelte di tipo impiantistico effettuate, i costi possono essere molto diversi. Ipotizzando il semplice caso di filtrazione, mantenendo costante il livello delle impurezze presenti in sospensione nell'acqua, i filtri avranno durata proporzionale alla portata di acqua che li ha attraversati. Tuttavia i filtri sono inefficaci verso contaminanti presenti in soluzione (ad esempio sali di calcio e magnesio, cloro) che possono influire in modo significativo sugli intervalli di manutenzione dell'intensificatore di pressione. Si rende pertanto necessario calcolare un contributo di costo relativo al consumo dell'acqua comprendente i costi di filtraggio:

$$C_w = 3600 m_w c_w T_l / 10^9 \quad [\text{€/pezzo}]$$

Dove:

- $m_w$  = portata d'acqua [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ], ottenuta da:

$$m_w = A v$$

In cui  $A$  è la sezione di passaggio del flusso d'acqua, dipendente dal diametro dell'ugello come:

$$A = \pi d^2 / 4 \quad [\text{mm}^2]$$

Mentre  $v$  è la velocità di efflusso del getto, ovvero:

$$v = 1000 \mu \sqrt{\frac{2p \cdot 10^6}{\rho}} \quad [\text{mm/s}]$$

- $c_w$  = costo unitario dell'acqua [€/m<sup>3</sup>].

### 3.2.8 SPESE GENERALI

Le spese generali riguardano i costi del personale non direttamente coinvolto con la fabbricazione del componente, nonché i costi inerenti l'illuminazione dei locali, il riscaldamento ecc. Tali costi non sono di facile determinazione né generalizzazione, pertanto possono essere assunti come proporzionali al costo del lavoro ed al floor-to-floor time:

$$C_{sg} = k_2 C_{lo} T_{ff} \quad [\text{€/pezzo}]$$

Il valore di  $k_2$  dipende fortemente dalla specifica realtà industriale e può essere considerato variabile tra 2 e 3.

### 3.2.9 IMPOSTAZIONE FINALE DEL MODELLO

Detto  $n$  il numero totale di componenti da produrre, il costo totale di fabbricazione per taglio idroabrasivo, può dunque essere espresso come:

$$C = C_v n + C_f = (C_{ip} + C_m + C_l + C_e + C_u + C_a + C_{sg} + C_w) n + C_{op} T_p + C_{os} T_s \quad [€]$$

### 3.2.10 RACCOLTA DATI

Molteplici risultano essere le fonti per un'esauritiva collezione di dati riguardo la tecnologia di taglio con getto d'acqua. Grazie ad esse è possibile effettuare una raccolta di valori per ogni parametro di interesse, in modo da giungere a definirne uno minimo ed uno massimo che il dato stesso può assumere. Dalla letteratura [Zheng, Han, Chen, Yeo, 1996], [Y.W.Seo, M.Ramulu, M.Hashish, 2005], [Henning, 2008], [Holmqvist e Honsberg, 2008], [Hashish, 2009], [Hashish, 2012], [Monno, 2012] si ricavano così i seguenti valori, classificati e distinti nelle varie categorie di appartenenza (tabelle 3.5-3.6-3.7-3.8-3.9):

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Diametro ugello primario in mm	0,05	0,50
Durata ugello in ore	100	2000
Tempo di cambio ugello in ore	0,01	0,1
Costo ugello nuovo in €	50	250
Perdite di carico	0,50	0,95

Tabella 3.5: Dati relativi all'ugello primario

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Diametro in mm del focalizzatore	0,76	1,2
Durata in ore	25	200
Tempo cambio in ore	0,01	0,1
Costo focalizzatore nuovo in €	50	200

Tabella 3.6: Dati relativi all'ugello focalizzatore

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Pressione dell'acqua in MPa	100	600
Costo in € dell'acqua al metro cubo	0,500	1,000

Tabella 3.7: Dati relativi all' acqua

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Densità in kg al metro cubo	3.500	4.000
Numero di riutilizzi	2	4
Tempo cambio in ore	0,01	0,1
Costo in € al kg	0,20	0,50
Portata abrasivo in metri cubi/ora	0,0045	0,0120

Tabella 3.8: Dati relativi all' abrasivo

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Durata pompa in ore	10.000	30.000
Rendimento pompa	0,40	0,90
Costo pompa nuova in €	50.000	600.000

Tabella 3.9: Dati relativi all' intensificatore di pressione



### 3.3 TECNOLOGIA WEDM - Formule matematiche e completamento del modello con impostazione finale

I costi variabili per una lavorazione di taglio per elettroerosione a filo possono essere individuati nei seguenti:

- Costo del generatore di tensione
- Costo della macchina per attuare il processo
- Costo della manodopera
- Costo dell'energia consumata nel processo
- Costo del filo
- Spese generali

#### 3.3.1 COSTO DEL GENERATORE DI TENSIONE

Il costo del generatore di tensione è quella parte di costo totale del dispositivo che può essere assegnata a ciascun pezzo realizzato. L'ammontare di questa quota dipende dal tempo che il generatore dedica alla lavorazione di quel componente ed, ipotizzando che il dispositivo sia esclusivamente dedicato alla macchina di taglio in questione, lavorando congiuntamente per lo stesso tempo floor-to-floor, viene valutato come:

$$C_{ip} = C_{go} T_{ff} \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $C_{go}$  = costo orario del generatore [€/h];
- $T_{ff}$  = tempo floor-to-floor [h].

Come nel caso precedente, gli addendi che si sommano nel calcolo del  $T_{ff}$  sono tutti dati del processo tranne la componente del tempo attivo di lavorazione che, come già detto, è valutabile nel processo di taglio come:

$$T_a = (L + 2 e) a s / (3600 MRR) \quad [h/pezzo]$$

Per elettroerosione a filo, il modello di produttività del processo viene calcolato nel seguente modo (rif. Par. 2.2.3):

$$MRR = 10^9 \frac{\eta V_{scarica} I_{peak} DC}{\rho [C_S(T_f - T_a) + H_f + C_l(T_v - T_f) + H_v]} \quad [mm^3/s]$$

Il costo orario del generatore di tensione viene valutato tramite la seguente espressione:

$$C_{go} = (C_{gammt} + C_{mag}) / T_{vg}$$

Dove:

- $C_{gammt}$  = costo del dispositivo ammortato all'anno corrente  $t$  [€];
- $C_{mag}$  = costo necessario alla sua manutenzione nell'arco della vita operativa [€];
- $T_{vg}$  = vita operativa residua del generatore [h].

Il costo del generatore viene considerato funzione della potenza, secondo una relazione lineare:

$$C_{gn} = C_{w0} + C_w W$$

Dove:

- $C_{w0}$  = termine noto di costo [€];
- $C_w$  = costo in € per Watt di potenza [€/W];
- $W$  = potenza del generatore [W], calcolabile come:

$$W = \frac{V_{scarica} I_{peak} DC}{\eta_{generatore}}$$

Il costo di manutenzione può invece essere stimato come una percentuale del costo della macchina nuova:

$$C_{mag} = \eta_{ma} C_{gn}$$

### 3.3.2 COSTO DELLA MACCHINA

Il costo della macchina necessaria per attuare il processo di taglio, come già visto, è quella parte del costo totale della macchina che può essere assegnato a ciascun pezzo realizzato. Tale quota viene stimata allo stesso modo del caso precedente, ovvero di macchinario utilizzato per lavorazione AWJ.

$$C_m = C_{mo} T_{ff} \quad [€/pezzo]$$

In cui  $C_{mo}$  è il costo orario della macchina [€/h], valutabile come:

$$C_{mo} = (C_{mammt} + C_{mam}) / T_{vm}$$

### 3.3.3 COSTO DELLA MANODOPERA

La componente di costo dovuta all'operatore che si ipotizza impegnato per le operazioni di carico e scarico del pezzo risulta identica a quella precedentemente già calcolata:

$$C_l = C_{lo} (T_c + T_s) \quad [\text{€/pezzo}]$$

### 3.3.4 COSTO DELL'ENERGIA CONSUMATA

Il costo dell'energia consumata nel processo è dovuto in parte all'assorbimento energetico del generatore ed in parte a quello del macchinario necessario per svolgere il processo.

La porzione di costo imputabile al generatore è calcolabile come:

$$C_{eg} = W T_l C_{kwh} / 1000 \quad [\text{€/pezzo}]$$

Essendo  $C_{kwh}$  il costo orario del chilowattora e 1000 il convertitore per passare da kW a W, unità di misura con cui è espressa la potenza della pompa.

Il costo del consumo energetico della macchina è invece calcolabile attraverso la seguente espressione:

$$C_{em} = C_{kwh} [e_{cn} (T_c + T_s) + e_v (T_c + T_s) + e_{gs} (T_c + T_s) + e_{cn} T_l + e_v t_l + e_{gp} T_l] / 1000 \quad [\text{€/pezzo}]$$

Dove:

- $e_{cn}$  = consumo energetico del controllo numerico negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];
- $e_v$  = consumo energetico della ventilazione negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];
- $e_{gs}$  = consumo energetico delle guide nello stato *stand-by* della macchina [W];
- $e_{gp}$  = consumo energetico delle guide nello stato *process* della macchina [W].

### 3.3.5 COSTO DEL FILO

Il materiale di consumo, in caso di taglio per elettroerosione, risulta essere solamente il filo metallico che funge da utensile. Esso subisce lo stesso processo di usura del pezzo, ovvero lo stesso processo di erosione che permette al pezzo di essere tagliato. Per tale motivo è possibile quantificare il consumo del filo, esattamente come già visto per il consumo del pezzo, tramite un rateo di asportazione ( $MRR_f$ ):

$$MRR_f = \eta_f \frac{V I_{DC}}{\rho H} \quad [m^3/s]$$

Dove  $\eta_f$  è la percentuale di potenza assorbita dal filo, che risulta essere la complementare a 1 della percentuale di potenza assorbita dal pezzo, ipotizzando che non ci sia energia dissipata nel dielettrico.

Si può arrivare così a stimare il costo del filo come:

$$C_f = 3,6 \times 10^9 MRR_f C_m T_a / S \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $C_m$  = costo del filo al metro [€/m];
- $S$  = sezione del filo [mm<sup>2</sup>];

### 3.3.6 SPESE GENERALI

Le spese generali, identicamente al caso precedente, si stimano nel seguente modo:

$$C_{sg} = k_2 C_{lo} T_{ff} \quad [€/pezzo]$$

### 3.3.7 IMPOSTAZIONE FINALE DEL MODELLO

Detto  $n$  il numero totale di componenti da produrre, il costo totale di fabbricazione per taglio elettroerosivo a filo, può dunque essere espresso come:

$$C = C_v n + C_f =$$

$$= (C_g + C_m + C_l + C_e + C_f + C_{sg}) n + C_{op} T_p + C_{os} T_s \quad [€]$$

### 3.3.8 RACCOLTA DATI

Grazie a diverse fonti [Uriarte, Herrero, Ivanov, Oosterling, Staemmeler, Tang, Allen, 2006], [Mohammadi, Tehrani, Emanian, Karimi, 2007], [Monno, 2012], [Klocke, Zeis, Klink, Veselovac, 2013] è possibile reperire in letteratura i seguenti valori per un taglio elettroerosivo a filo, classificati nelle varie categorie di appartenenza (tabelle 3.10-3.11):

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Gap laterale in mm	0,025	0,500
Diametro del filo in mm	0,05	0,500
Tempo cambio in ore	0,010	0,100
Velocità riavvolgimento sulla bobina in mm/s	2,0	3,0
Costo in € al metro	0,015	0,030
Frazione di potenza assorbita dal pezzo	50%	90%

Tabella 3.10: Dati relativi al filo

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Corrente di picco in A	1	20
Duty cycle	0,01	0,90
Frequenza di scarica in kHz	10	20
Tensione di scarica in V	30	60
Durata generatore in ore	10.000	30.000
Costo generatore nuovo in €	20.000	300.000
Rendimento generatore	0,5	0,9

Tabella 3.11: Dati relativi al generatore di tensione

### 3.4 TECNOLOGIA PER FRESATURA- Formule matematiche e completamento del modello con impostazione finale

I costi variabili per una lavorazione di taglio per fresatura possono essere individuati nei seguenti:

- Costo della macchina fresatrice
- Costo della manodopera
- Costo dell'energia consumata nel processo
- Costo dell'utensile
- Spese generali

#### 3.4.1 COSTO DELLA FRESATRICE

Il costo della fresatrice è quella parte del costo totale della macchina che può essere assegnato a ciascun pezzo realizzato. Tale quota dipende dal tempo che la macchina stessa dedica alla lavorazione di quel componente e viene valutato come:

$$C_m = C_{mo} T_{ff} \quad [\text{€/pezzo}]$$

In cui  $C_{mo}$  è il costo orario della macchina [€/h], valutabile come:

$$C_{mo} = (C_{mammt} + C_{mam}) / T_{vm}$$

Essendo  $C_{mammt}$  il costo della macchina ammortata all'anno corrente  $t$  [€],  $C_{mam}$  il costo necessario alla sua manutenzione [€] e  $T_{vm}$  la sua vita operativa residua [h].

Come nei precedenti casi, gli addendi che si sommano nel calcolo del  $T_{ff}$  sono tutti dati del processo tranne la componente del tempo attivo di lavorazione che è valutabile nel taglio per fresatura come:

$$T_a = (L + 4 e) a_s / MRR \quad [\text{h/pezzo}]$$

In cui l'extracorsa non è solamente alla fine ed all'inizio del taglio, in direzione parallela al taglio stesso, ma risulta avere contributi anche in direzione perpendicolare al taglio stesso; ne consegue che sia moltiplicata quattro volte anziché due come negli altri casi.

Per fresatura, il modello di produttività del processo viene calcolato nel seguente modo (rif. Par. 2.3.3):

$$MRR = 10^3 v \frac{a_z Z}{\pi} S \quad [\text{mm}^3/\text{min}]$$

### 3.4.2 COSTO DELLA MANODOPERA

Esattamente come nelle precedenti valutazioni, si ipotizza che l'operatore sia impegnato per le operazioni di carico e scarico del pezzo; otteniamo dunque che il costo del lavoro sia:

$$C_l = C_{lo} (T_c + T_s) \quad [\text{€/pezzo}]$$

### 3.4.3 COSTO DELL'ENERGIA CONSUMATA

Diversamente dalle altre tipologie di taglio analizzate, durante un processo di fresatura si ha un contatto diretto tra utensile e pezzo; pertanto il consumo energetico è dovuto in parte anche alla forza resistente durante il taglio.

La porzione di costo imputabile alla potenza assorbita durante il taglio è calcolabile come:

$$C_{ef} = W T_l C_{kwh} / 1000 \quad [\text{€/pezzo}]$$

Dove la potenza  $W$  viene valutata come:

$$W = F_r V_t \quad [W]$$

In cui  $V_t$  è la velocità di taglio in [m/s], mentre  $F_r$  è la forza resistente durante il taglio, già valutata (rif. Par. 2.3.5) come:

$$F_r = P_t s Z_l \quad [N]$$

Il costo del consumo energetico dovuto agli stati della macchina è invece calcolabile attraverso la seguente espressione:

$$C_{em} = C_{kwh} [e_{cn} (T_c + T_s) + e_v (T_c + T_s) + e_{gs} (T_c + T_s) + e_{et} (T_c + T_s) + e_{cn} T_l + e_v t_l + e_{gp} T_l + e_{et} T_l + e_{pt} T_l] / 1000 \quad [\text{€/pezzo}]$$

Dove:

- $e_{cn}$  = consumo energetico del controllo numerico negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];
- $e_v$  = consumo energetico della ventilazione negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];
- $e_{gs}$  = consumo energetico delle guide nello stato *stand-by* della macchina [W];
- $e_{et}$  = consumo energetico dovuto all'evacuazione dei trucioli negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];

- $e_{gp}$  = consumo energetico delle guide nello stato *process* della macchina [W];
- $e_{pt}$  = consumo energetico dovuto alla potenza del taglio [W] che si sviluppa a causa della forza di contatto tra utensile e pezzo durante il taglio, calcolabile come:

$$e_{pt} = F_r L / 3,6 \times 10^6 t$$

In cui  $F_r$  è la forza resistente mentre  $L$  e  $t$  sono rispettivamente la lunghezza [mm] e la durata [h] del taglio, durata che viene assunta pari al tempo attivo di lavorazione.

#### 3.4.4 COSTO DELL'UTENSILE

Il costo dell'utensile, materiale di consumo in caso di fresatura, viene valutato con la seguente espressione:

$$C_u = C_{us} / n_p + C_c \quad [\text{€/pezzo}]$$

Dove

- $C_{us}$  = costo del singolo utensile relativo alla durata  $T$  [€], calcolato come:

$$C_{us} = C_{ui} / n_{ti} + C_{up} / n_t$$

In cui:

- $C_{ui}$  = costo dell'inserto [€];
  - $C_{up}$  = costo dello stelo porta inserto [€];
  - $n_{ti}$  = numero degli spigoli taglienti attivi dell'inserto;
  - $n_t$  = numero degli spigoli taglienti attivi corrispondenti alla vita dello stelo porta inserto.
- $n_p$  = numero di pezzi realizzati con un singolo utensile, valutabile nel seguente modo:

$$n_p = \frac{T}{T_a} k$$

Essendo  $T$  la durata del tagliente dell'utensile [h] e  $k$  il numero di pezzi ottenibili da uno stesso foglio di lamiera;

- $C_c$  = costo di cambio utensile, ovvero:

$$C_c = C_{lo} t_{cu}$$

In cui  $C_{lo}$  è il costo dell'operatore mentre  $t_{cu}$  è il tempo di cambio utensile.



### 3.4.5 SPESE GENERALI

Esattamente come nei precedenti casi, le spese generali si stimano nel seguente modo:

$$C_{sg} = k_2 C_{lo} T_{ff} \quad [€/pezzo]$$

### 3.4.6 IMPOSTAZIONE FINALE DEL MODELLO

Detto  $n$  il numero totale di componenti da produrre, il costo totale di fabbricazione per taglio ottenuto con fresatura può dunque essere espresso come:

$$C = C_v n + C_f = (C_m + C_l + C_e + C_u + C_{sg}) n + C_{op} T_p + C_{os} T_s \quad [€]$$

### 3.4.7 RACCOLTA DATI

La raccolta dati effettuata tramite l'analisi dello stato dell'arte per un taglio ottenuto con fresatura [Santochi, 2000], [Uriarte, Herrero, Ivanov, Oosterling, Staemmeler, Tang, Allen, 2006], [Quintana, Ciurana, 2011], [Klocke, Zeis, Klink, Veselovac, 2013] ci permette di ricavare i seguenti valori, così suddivisi (tabelle 3.12-3.13):

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Numero degli spigoli taglienti attivi nell'inserto inserto (N.s.i.)	2	4
N.s.i. corrispondenti vita stelo porta inserto	100	300
Avanzamento a dente in mm	0,010	0,500
Velocità di taglio in m/minuto	10	280
Numero denti fresa	2	6
Diametro della fresa in mm	1	20
Costo dell'inserto in €	1	20
Costo dello stelo porta inserto in €	50	200

Tabella 3.12: Dati relativi alla fresa

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Costo macchina fresatrice nuova in €	50.000	100.000
Durata macchina in ore	15.000	30.000
Rendimento della macchina	0,65	0,72

Tabella 3.13: Dati relativi alla fresatrice

### 3.5 TECNOLOGIA LBM – Formule matematiche e completamento del modello con impostazione finale

I costi variabili per una lavorazione di taglio laser possono essere individuati nei seguenti:

- Costo della sorgente laser
- Costo della macchina necessaria per effettuare il processo
- Costo della manodopera
- Costo dell'energia consumata nel processo
- Costo del gas di assistenza
- Spese generali

#### 3.5.1 COSTO DELLA SORGENTE LASER

Il costo della sorgente laser è quella parte di costo totale del dispositivo che può essere assegnata a ciascun pezzo realizzato. L'ammontare di questa quota dipende dal tempo che la sorgente dedica alla lavorazione di quel componente e, ipotizzando che il dispositivo sia dedicato alla macchina di taglio in questione lavorando congiuntamente per lo stesso tempo floor-to-floor, viene valutato come:

$$C_{sl} = C_{slo} T_{ff} \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $C_{slo}$  = costo orario della sorgente [€/h];
- $T_{ff}$  = tempo floor-to-floor [h].

Come già visto per le altre tecnologie, gli addendi che si sommano nel calcolo del  $T_{ff}$  sono tutti dati del processo tranne la componente del tempo attivo di lavorazione che è nuovamente valutabile come:

$$T_a = (L + 2 e) a s / (3600 MRR) \quad [h/pezzo]$$

Per taglio con fascio laser, il modello di produttività del processo viene calcolato nel seguente modo:

$$MRR = 10^9 \frac{W (1-r)}{\rho H} \quad [mm^3/s]$$

Il costo orario della sorgente laser viene valutato tramite la seguente espressione:

$$C_{slo} = (C_{slamnt} + C_{masl}) / T_{vsl}$$

Dove:

- $C_{slamnt}$  = costo del dispositivo ammortato all'anno corrente  $t$  [€];
- $C_{masl}$  = costo necessario alla sua manutenzione nell'arco della vita operativa [€];
- $T_{vsl}$  = vita operativa residua del sistema [h].

Il costo della sorgente viene considerato funzione della potenza, secondo la seguente relazione:

$$C_{sln} = C_{w0} + C_w W$$

Dove:

- $C_{w0}$  = termine noto di costo [€];
- $C_w$  = costo in € per Watt di potenza [€/W];
- $W$  = potenza della sorgente laser [W].

Il costo di manutenzione può invece essere stimato come una percentuale del costo della macchina nuova:

$$C_{masl} = \eta_{ma} C_{sln}$$

### 3.5.2 COSTO DELLA MACCHINA

Il costo della macchina necessaria per attuare il processo di taglio, come già visto, è quella parte del costo totale della macchina che può essere assegnato a ciascun pezzo realizzato. Tale quota viene stimata allo stesso modo dei casi precedenti, ovvero:

$$C_m = C_{mo} T_{ff} \quad [\text{€/pezzo}]$$

In cui  $C_{mo}$  è il costo orario della macchina [€/h], valutabile come:

$$C_{mo} = (C_{mamnt} + C_{mam}) / T_{vm}$$

Essendo  $C_{mamnt}$  il costo della macchina ammortata all'anno corrente  $t$  [€],  $C_{mam}$  il costo necessario alla sua manutenzione [€] e  $T_{vm}$  la sua vita operativa residua [h].

### 3.5.3 COSTO DELLA MANODOPERA

La componente di costo dovuta all'operatore che si ipotizza impegnato per le operazioni di carico e scarico del pezzo risulta identica a quelle precedentemente già calcolate:

$$C_l = C_{lo} (T_c + T_s) \quad [\text{€/pezzo}]$$

### 3.5.4 COSTO DELL'ENERGIA CONSUMATA

Il costo dell'energia consumata nel processo è dovuto in parte all'assorbimento energetico della sorgente ed in parte a quello del macchinario necessario per svolgere il processo.

La porzione di costo imputabile alla sorgente è calcolabile come:

$$C_{esi} = W T_l C_{kwh} / 1000 \eta_{laser} \quad [€/pezzo]$$

Essendo  $W$  il consumo energetico comprensivo del sistema di raffreddamento dell'acqua e  $\eta_{laser}$  il rendimento globale della sorgente laser.

Il costo del consumo energetico della macchina è invece calcolabile attraverso la seguente espressione:

$$C_{em} = C_{kwh} [e_{cn} (T_c + T_s) + e_v (T_c + T_s) + e_{gs} (T_c + T_s) + e_{cn} T_l + e_v t_l + e_{gp} T_l] / 1000 \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $e_{cn}$  = consumo energetico del controllo numerico negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];
- $e_v$  = consumo energetico della ventilazione negli stati *stand-by* e *process* della macchina [W];
- $e_{gs}$  = consumo energetico delle guide nello stato *stand-by* della macchina [W];
- $e_{gp}$  = consumo energetico delle guide nello stato *process* della macchina [W].

### 3.5.5 COSTO DEL GAS DI ASSISTENZA

Il materiale di consumo, in caso di taglio per con fascio laser, risulta essere solamente il gas di assistenza, il cui costo viene stimato nel seguente modo:

$$C_g = Q C_{gv} T_l \quad [€/pezzo]$$

Dove:

- $Q$  = portata del gas [ $m^3/h$ ] costante ed unicamente dipendente dalla tipologia di gas utilizzato;
- $C_{gv}$  = costo unitario del gas [ $€/m^3$ ].

### 3.5.6 SPESE GENERALI

Le spese generali, come negli altri casi, si stimano nel seguente modo:

$$C_{sg} = k_2 C_{lo} T_{ff} \quad [€/pezzo]$$

### 3.5.7 IMPOSTAZIONE FINALE DEL MODELLO

Detto  $n$  il numero totale di componenti da produrre, il costo totale di fabbricazione per taglio con fascio laser può dunque essere espresso come:

$$\begin{aligned} C &= C_v n + C_f = \\ &= (C_{sl} + C_m + C_l + C_e + C_g + C_{sg}) n + C_{op} T_p + C_{os} T_s \quad [€] \end{aligned}$$

### 3.5.8 RACCOLTA DATI

Tra i molti e diversi dati sperimentali trovati in letteratura, è stata effettuata una collezione di valori relativamente al caso specifico di interesse, ovvero taglio di lamiera metallica con sorgente laser [Zheng, Han, Chen, Yeo, 1996], [Verma, Bao, Nagarathanm, 2002], [Monno, 2012]. I parametri sono così classificati e riassunti (tabelle 3.14-3.15):

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Portata in metricubi/ora	1	3
Costo in €/m <sup>3</sup>	20	30

Tabella 3.14: Dati relativi al gas di assistenza

PARAMETRO	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
Potenza sorgente in Watt	500	20.000
Rendimento sorgente	0,02	0,70
Costo unitario di potenza	50	120
Durata sorgente	15.000	20.000

Tabella 3.15: Dati relativi alla sorgente laser

## 4. Implementazione dello strumento di calcolo

---

In questo capitolo vengono presentati i concetti precedentemente sviluppati per la valutazione del costo totale di taglio di una lamiera metallica, attraverso un'attuazione pratica che si concretizza in un algoritmo di calcolo specifico per ogni lavorazione. Lo scopo è quello di creare uno strumento utile e tangibile per aiutare le imprese nel quantificare una parte di costi connessi alla loro attività produttiva e guidare quindi le stesse verso una scelta efficiente tra le tipologie di taglio rese disponibili dalla moderna tecnologia. Seguirà nella tesi un'illustrazione delle specifiche obiettivo del presente progetto, un'accurata descrizione dello strumento ed una precisa spiegazione di come siano state implementate le funzioni di calcolo.

### 4.1 SPECIFICHE DI PROGETTO

Risulta necessario, a questo punto dell'analisi, stabilire la specifica di progetto, la quale rappresenta lo scopo che ci si propone di raggiungere attraverso lo sviluppo dello strumento di calcolo su un foglio Excel, tramite l'utilizzo di formule, funzioni e Macro.

Il foglio di calcolo è stato pensato per il taglio di lamiere metalliche tramite quattro diversi tipi di lavorazioni:

- AWJC: taglio idroabrasivo;
- WEDM: taglio elettroerosivo a filo;
- MILLING: taglio per fresatura;
- LBM: taglio con fascio laser.

I materiali presenti di default nello strumento tra i quali è possibile scegliere per effettuare la lavorazione sono:

- Peraluman 5754: lega alluminio-magnesio;
- 34CrNiMo6: acciaio debolmente legato;
- X6Cr17: acciaio fortemente legato;
- CuZn39Pb3: ottone (lega rame-zinco).

L'output finale risulta essere il costo totale di ciascuna lavorazione, il quale può essere considerato singolarmente oppure in maniera comparativa rispetto alle altre tre tecnologie.

## 4.2 DESCRIZIONE DELLO STRUMENTO

Al fine di fornire una chiara spiegazione della struttura dell'algoritmo, la presente sezione descrittiva viene suddivisa in tre parti, di seguito analizzate singolarmente:

**Inizializzazione:** contiene tutto ciò che viene inserito manualmente dall'operatore, a livello di dati di input del problema da analizzare;

**Calcoli da automatizzare:** include tutte le operazioni che il calcolatore svolge in automatico, operazioni che non necessariamente dovranno essere mostrate all'operatore;

**Risultati da ottenere:** comprende un insieme di dati, grafici, tabelle che racchiuderanno gli elementi riassuntivi del problema preso in esame e che dovranno manifestarsi automaticamente all'operatore.

### 4.2.1 INIZIALIZZAZIONE

Il foglio di calcolo da impostare dovrebbe potersi adattare a situazioni di diversa natura che possano richiederne l'utilizzo, quale il taglio di lamiere costituite da materiali di volta in volta differenti.

A livello generale possono essere classificati i dati INPUT, che l'utilizzatore dovrà inserire manualmente, in due macrocategorie:

Dati generali necessari per l'implementazione: sono i dati che risultano essere non differenziali, ovvero indipendenti dalla tecnologia ma necessari comunque allo sviluppo dello strumento. Essi vengono suddivisi in categorie di appartenenza, al fine di agevolare la comprensione e l'utilizzo dello strumento. Vengono elencati nella seguente tabella (4.1):

CATEGORIA	DATO DI INPUT
<b>Caratteristiche del taglio</b>	Spessore della lamiera da tagliare
	Extracorsa ad inizio e fine del taglio
	Lunghezza del taglio da effettuare
<b>Materiale da tagliare</b>	Densità del materiale
	Modulo Young
	Indice di riflettività
	Temperatura di fusione
	Temperatura di vaporizzazione
	Calore latente di fusione
	Calore latente di vaporizzazione
	Calore specifico allo stato solido
	Calore specifico allo stato liquido
	Pressione specifica di taglio
<b>Tempi</b>	Tempi di programmazione
	Tempo di carico pezzo
	Tempo di scarico pezzo
	Tempo di avvicinamento
	Tempo di allontanamento
	Tempo di vita macchinario
	Tempo di utilizzo annuo macchinario
	Durata dell'investimento
<b>Costi</b>	Costi orari di set up
	Costi orari di programmazione
	Costo dell' operatore
	Costo dell' elettricità
<b>Altri dati</b>	Tasso di interesse dell'investimento
	Percentuale di spese generali
	Temperatura ambiente
	Numero totale di componenti da produrre

Tabella 4.1: Dati INPUT generali

Dati specifici di ogni lavorazione: sono tutti i rimanenti dati necessari al funzionamento dello strumento di calcolo che però dipendono dal tipo di tecnologia di taglio. Come per i precedenti, viene presentata una tabella riassuntiva degli stessi (4.2), in riferimento alla lavorazione cui appartengono:



TECNOLOGIA	CATEGORIA	DATO DI INPUT
AWJC	Ugello	Diametro dell'ugello
		Durata media
		Tempo di sostituzione dell'ugello
		Costo ugello nuovo
		Perdite di carico $\mu$
	Focalizzatore	Diametro del focalizzatore
		Durata media
		Tempo di sostituzione del focalizzatore
		Costo focalizzatore nuovo
	Abrasivo	Densità dell'abrasivo
		Numero di volte in cui viene riutilizzato
		Tempo di sostituzione
		Costo unitario
		Portata dell' abrasivo
	Acqua	Pressione di alimentazione dell'acqua
		Costo unitario
	Macchina e pompa	Durata della macchina
		Durata della pompa
		Rendimento della pompa
		Costo unitario di potenza
		Tempi di set up
		Costo della macchina nuova
		Percentuale di manutenzione della pompa
		Percentuale di manutenzione della macchina
		Numero di macchine per ogni intensificatore
		Assorbimento di potenza in controllo numerico
		Assorbimento di potenza delle guide in standby
		Assorbimento di potenza delle guide in lavorazione
		Assorbimento di potenza della ventilazione
		Tempo trascorso dall' acquisto della macchina
		Tempo trascorso dall' acquisto della pompa
WEDM	Filo	Gap laterale
		Diametro del filo
		Tempo di sostituzione del filo
		Velocità di riavvolgimento sulla bobina
		Costo unitario
	Pezzo	Frazione di potenza assorbita dal pezzo
	Macchina e generatore	Corrente di picco
		Duty Cycle
		Frequenza di scarica
		Tensione di scarica
		Durata della macchina

		Durata del generatore
		Costo unitario di potenza
		Costo della macchina nuova
		Percentuale di manutenzione della macchina
		Percentuale di manutenzione del generatore
		Rendimento del generatore
		Tempi di set up
		Assorbimento di potenza in controllo numerico
		Assorbimento di potenza delle guide in standby
		Assorbimento di potenza delle guide in lavorazione
		Assorbimento di potenza della ventilazione
		Tempo trascorso dall' acquisto della macchina
		Tempo trascorso dall' acquisto del generatore
<b>MILLING</b>	Fresa	Numero di spigoli taglienti attivi nell' inserto
		Numero di spigoli taglienti attivi nell' inserto corrispondenti vita dello stelo porta inserto
		Avanzamento a dente
		Velocità di taglio
		Numero di denti della fresa
		Diametro della fresa
		Costo dell'inserto
		Costo dello stelo porta inserto
		Tempo di sostituzione dell' utensile
		Durata del tagliente dell'utensile
		Numero di pezzi ottenibili da un foglio di lamiera
	Fresatrice	Costo della macchina fresatrice nuova
		Percentuale di manutenzione macchina
		Durata della macchina
		Tempi di set up
		Assorbimento di potenza in controllo numerico
		Assorbimento di potenza delle guide in standby
		Assorbimento di potenza delle guide in lavorazione
		Assorbimento di potenza della ventilazione
		Assorbimento di potenza dell' evacuazione trucioli
		Rendimento della macchina fresatrice
		Tempo trascorso dall' acquisto della macchina
<b>LBM</b>	Gas di assistenza	Portata del gas

		Costo unitario
	Pezzo	Ampiezza del taglio
	Macchina e sorgente	Potenza della sorgente
		Rendimento della sorgente
		Costo unitario di potenza
		Costo della macchina nuova
		Percentuale di manutenzione della macchina
		Percentuale di manutenzione della sorgente
		Tempi di set up
		Durata della sorgente
		Durata della macchina
		Numero di macchine per ogni sorgente
		Assorbimento di potenza in controllo numerico
		Assorbimento di potenza delle guide in standby
		Assorbimento di potenza delle guide in lavorazione
		Assorbimento di potenza della ventilazione
		Tempo trascorso dall'acquisto della macchina
		Tempo trascorso dall'acquisto della sorgente

Tabella 4.2: Dati INPUT specifici

#### 4.2.2 CALCOLI DA AUTOMATIZZARE

Il foglio di calcolo dovrebbe poter automatizzare il maggior numero possibile di operazioni, mostrando all'operatore solo quelle necessarie per le deduzioni di suo interesse.

Come regola generale, l'algoritmo dovrebbe essere in grado di generare autonomamente le soluzioni del problema, dipendentemente dai dati inseriti dall'utilizzatore. I dati di OUTPUT rappresentano valori calcolati grazie a quelli di INPUT e necessari, esattamente come questi ultimi, al funzionamento dello strumento. Ne viene presentato un elenco esauriente nella tabella che segue (4.3), suddiviso per tipologia di lavorazione e categoria di appartenenza, come prima; la relativa enunciazione della formula che ne permette il calcolo grazie ai dati in INPUT è illustrata al capitolo 3 del presente elaborato:

TECNOLOGIA	CATEGORIA	DATO DI INPUT
AWJC	Ugello	Costo di cambio dell'ugello
	Focalizzatore	Costo di cambio del focalizzatore
	Abrasivo	Costo di cambio dell'abrasivo
		Mixing ratio
	Acqua	Densità dell'acqua
		Portata d' acqua
		Velocità di efflusso a valle dell'ugello
	Pezzo	Tempo di lavorazione del pezzo
		Rateo di asportazione
		Velocità di avanzamento
		Tempo attivo
	Macchina e pompa	Potenza della pompa
		Costo della pompa nuova
		Floor-to-floor time
		Costo di manutenzione della pompa
		Costo di manutenzione della macchina
		Quota di ammortamento pompa
		Quota di ammortamento macchina
		Costo della pompa ammortata
		Costo orario della pompa
		Costo della macchina ammortata
		Costo orario della macchina
WEDM	Filo	Costo di sostituzione del filo
		Consumo del filo
		Sezione del filo
	Pezzo	Tempo di lavorazione del pezzo
		Rateo di asportazione
		Velocità di avanzamento
		Tempo attivo
		Ampiezza del taglio
	Macchina e generatore	Durata della scarica
		Floor-to-floor time
		Potenza del generatore
		Costo del generatore nuovo
		Costo di manutenzione del generatore
		Costo di manutenzione della macchina
		Quota di ammortamento della macchina
		Quota di ammortamento del generatore
		Costo della macchina ammortata
		Costo del generatore ammortato
		Costo orario della macchina
		Costo orario del generatore
MILLING	Fresa	Costo di sostituzione dell' utensile
		Costo dell'utensile relativo alla durata
		Numero di pezzi realizzati con un singolo utensile

		Numero di denti in presa
	Pezzo	Forza di taglio
		Potenza di taglio
		Floor-to-floor time
		Tempo di lavorazione
		Rateo d' asportazione
		Velocità di avanzamento
		Tempo attivo
		Sezione del truciolo
	Fresatrice	Potenza della fresatrice
		Costo di manutenzione della macchina
		Quota di ammortamento della macchina
		Costo della macchina ammortata
		Costo della macchina orario
<b>LBM</b>	Pezzo	Tempo di lavorazione del pezzo
		Rateo di asportazione
		Velocità di avanzamento
		Tempo attivo
	Macchina e sorgente	Floor-to-floor time
		Costo della sorgente laser nuova
		Costo di manutenzione della sorgente
		Costo di manutenzione della macchina
		Quota di ammortamento della sorgente
		Quota di ammortamento della macchina
		Costo della sorgente ammortata
		Costo orario della sorgente
		Costo della macchina ammortata
		Costo orario della macchina

Tabella 4.3: Dati OUTPUT

#### 4.2.3 RISULTATI DA OTTENERE

In questa sezione verranno trattati i calcoli da automatizzare, i cui risultati devono necessariamente risultare visibili all'operatore una volta terminata l'implementazione dell'algoritmo, nel modo più chiaro possibile.

E' opportuno pertanto classificare i risultati da visualizzare in:

- **Tabelle riassuntive per ogni algoritmo:** relativamente ad ogni lavorazione, sarà possibile visualizzare i costi variabili unitari e totali, i costi fissi ed il costo totale finale;
- **Tabelle e grafici specifici di costo:** verrà effettuata un'analisi di sensitività relativamente ai parametri che risultano di maggior interesse per ogni lavorazione; lo strumento dovrà restituire il riempimento automatico della tabella di riferimento,

graficando i dati del costo totale in funzione dei valori che il parametro di interesse può assumere;

- **Tabelle e grafici generali di costo:** verrà effettuata un'ulteriore analisi di sensitività, relativamente ai parametri che risultano di maggiore interesse per un confronto tra le quattro tecnologie di taglio; lo strumento dovrà restituire il riempimento automatico della tabella di riferimento, graficando i dati del costo totale di ogni tecnologia in funzione dei valori che il parametro di interesse può assumere e potendone così effettuare una comparazione;
- **Istogrammi generali di costo:** in riferimento al confronto tra i possibili materiali costituenti la lamiera oggetto di taglio, sarebbe utile che il software rappresentasse i risultati sotto forma di istogrammi, uno per ogni lavorazione, con una barra per ciascun materiale di altezza corrispondente al costo totale.

### 4.3 SVILUPPO DELLO STRUMENTO

Lo sviluppo dello strumento finale si compone di due diverse fasi: la costruzione dell'interfaccia grafica necessaria all'utilizzo e l'implementazione di funzioni ed algoritmi di calcolo necessari al funzionamento.

#### 4.3.1 INTERFACCIA GRAFICA

Al fine di sviluppare uno strumento di calcolo che permettesse di raggiungere gli scopi prefissati e precedentemente illustrati, si è ritenuto opportuno utilizzare l'applicativo Excel come origine cui fare riferimento per il reperimento dei dati.

Sono dapprima stati creati sei diversi fogli di calcolo, così denominati:

1. **Dati:** il primo foglio è stato pensato per contenere tutte le tabelle necessarie all'inserimento dei dati di input non differenziali, ovvero non discriminanti tra le varie tecnologie ma comunque necessari al funzionamento del software. In questa prima interfaccia che si presenta all'utente è anche contenuto un riquadro che sintetizza i passi da compiere per l'utilizzo dello strumento, riquadro che viene di seguito riportato (Figura 4.1):

- 1) Inserire i valori relativi alla colonna INPUT nel foglio Dati
- 2) Cliccare il pulsante "CARICA DATI"
- 3) Aprire il foglio relativo alla lavorazione di interesse:
  - AWJC: taglio idroabrasivo
  - WEDM: taglio per elettroerosione a filo
  - MILLING: taglio per fresatura
  - LBM: taglio laser
- 4) Inserire i valori INPUT nel foglio scelto
- 5) Cliccare il pulsante "CALCOLA"
- 6) Scegliere il materiale da lavorare -> Si ottiene il costo totale
- 7) Cliccare il pulsante relativo al calcolo dei costi in funzione del parametro di interesse -> Si ottiene il relativo grafico
- 8) Dopo aver inserito tutti i dati di INPUT in ogni foglio, nel foglio Grafici cliccare il pulsante relativo al calcolo dei costi in funzione del parametro di interesse -> Si ottiene il relativo

Figura 4.1: Passi da compiere per l'utilizzo dello strumento

Il foglio **Dati** contiene le tabelle relative ai dati di INPUT suddivisi nelle categorie precedentemente esposte (Tabella 4.1). Ogni tabella riporta cinque colonne, titolate rispettivamente:

- "DATO INSERITO" ovvero il nome del parametro;
- "U.M.", la relativa unità di misura;
- "INPUT", nella cui casella l'utilizzatore dovrà inserire il valore;
- "MIN", il parametro non assume solitamente valori al di sotto di tale soglia;
- "MAX", il parametro non assume solitamente valori al di sopra di tale soglia.

I valori minimi e massimi sono stati ricavati grazie all'analisi della letteratura scientifica ma grazie anche a fonti applicative industriali, il tutto riportato al capitolo 3 del presente elaborato.

Si illustra di seguito l'esempio di una delle tabelle relative al primo foglio Excel, ovvero "Caratteristiche del taglio" (Figura 4.2):

#### DATI GENERALI

CARATTERISTICHE DEL TAGLIO				
DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Spessore di taglio	mm		1	10
Extracorsa	mm		1	10
Lunghezza del taglio	mm		1	10000

Figura 4.2: Struttura delle tabelle di riferimento

2. **AWJC**: foglio relativo al taglio idroabrasivo. Per una maggior immediatezza di comprensione ed al fine di facilitare l'uso dello strumento, si è ritenuto opportuno costruire i successivi fogli, ciascuno relativo ad una particolare tecnologia, collegando le tabelle riferite ad ogni categoria (rif. Tabelle 4.2-4.3) ad un disegno esemplificativo del particolare taglio. In questo modo per il taglio di lamiera con getto d'acqua ed abrasivo si propone la seguente immagine (Figura 4.3):

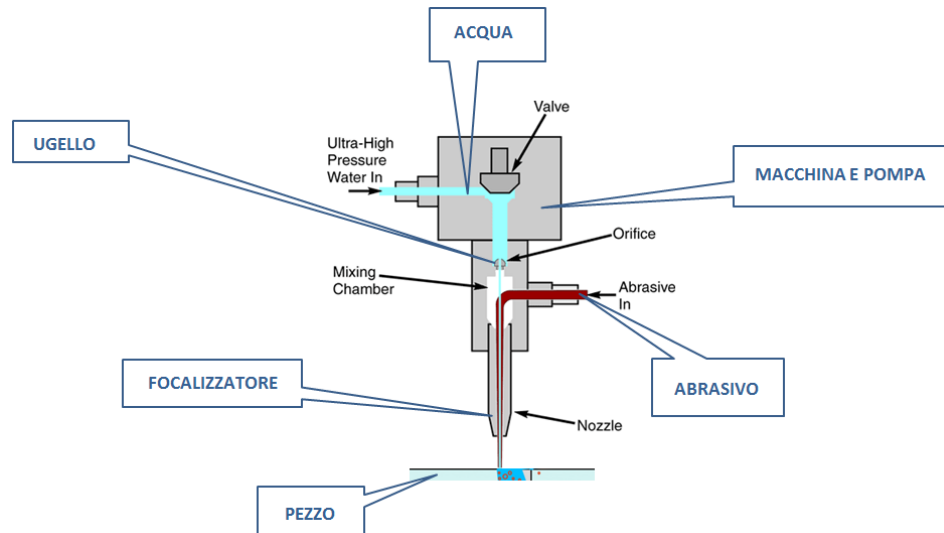


Figura 4.3: Interfaccia del foglio AWJC

Nel medesimo foglio sarà possibile non solo inserire i dati INPUT ed ottenere quelli in OUTPUT, ma anche visualizzare costi variabili, fissi e totali ed effettuare un'analisi di sensitività, come precedentemente accennato, sui parametri ritenuti di maggior interesse per la tecnologia in questione. Interessante sarà poter capire come varia il costo totale di lavorazione per AWJC in funzione di:

- Pressione di alimentazione dell'acqua;
- Densità dell'abrasivo;
- Portata di abrasivo;
- Diametro dell'ugello primario;
- Diametro dell'ugello focalizzatore;
- Tempi di set-up della macchina.

3. **WEDM**: foglio relativo al taglio elettroerosivo a filo. Come già visto, per una maggior immediatezza di comprensione ed al fine di facilitare l'uso dello strumento, si è costruito il foglio collegando le tabelle riferite ad ogni categoria ad un disegno esemplificativo del taglio. In questo modo per il taglio di lamiera con filo si propone la seguente immagine (Figura 4.4):



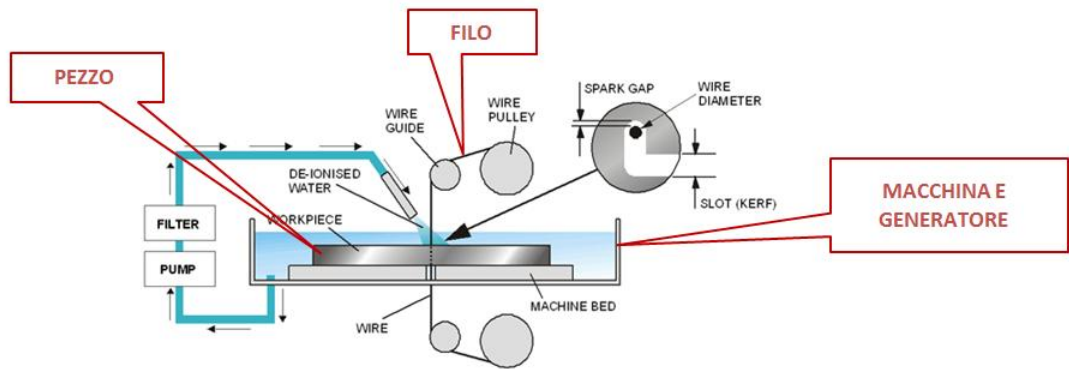


Figura 4.4: Interfaccia del foglio WEDM

Nel medesimo foglio sarà possibile non solo inserire i dati INPUT ed ottenere quelli in OUTPUT, ma anche visualizzare costi variabili, fissi e totali ed effettuare un'analisi di sensitività sui parametri ritenuti di maggior interesse per la tecnologia in questione. Interessante sarà poter capire come varia il costo totale di lavorazione per WEDM in funzione di:

- Tensione del generatore;
- Corrente di alimentazione;
- Sezione del filo;
- Duty Cycle;
- Tempi di set-up della macchina.

4. **MILLING:** foglio relativo al taglio per fresatura. Esattamente come nei precedenti casi, per una maggior immediatezza di comprensione ed al fine di facilitare l'uso dello strumento, si è costruito il foglio collegando le tabelle riferite ad ogni categoria ad un disegno esemplificativo del taglio. In questo modo per il taglio di lamiera con fresa si propone la seguente immagine (Figura 4.5):

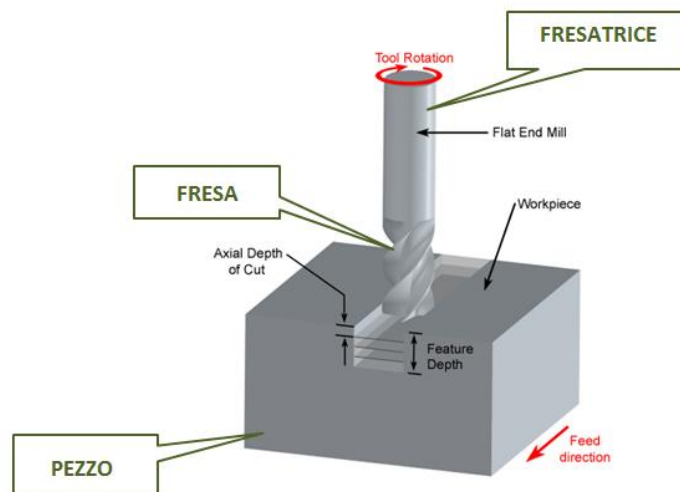


Figura 4.5: Interfaccia del foglio MILLING

Nel medesimo foglio sarà possibile non solo inserire i dati INPUT ed ottenere quelli in OUTPUT, ma anche visualizzare costi variabili, fissi e totali ed effettuare un'analisi di sensitività sui parametri ritenuti di maggior interesse per la tecnologia in questione. Interessante sarà poter capire come varia il costo totale di lavorazione per MILLING in funzione di:

- Potenza della fresatrice;
- Numero di denti della fresa;
- Diametro della fresa;
- Velocità di taglio;
- Tempi di set-up della macchina.

5. **LBM:** foglio relativo al taglio laser. E' stato costruito il foglio collegando le tabelle riferite ad ogni categoria ad un disegno esemplificativo del taglio, come nei precedenti casi. In questo modo per il taglio di lamiera con fascio laser si propone la seguente immagine (Figura 4.6):

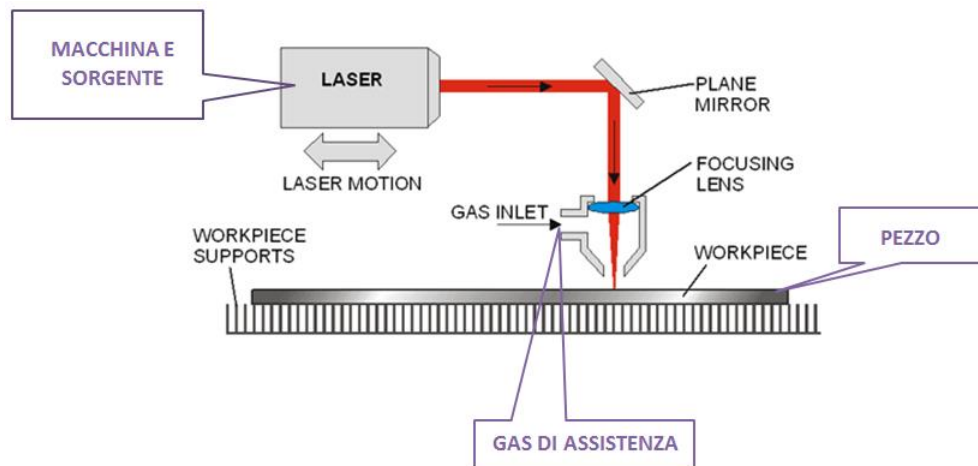


Figura 4.6: Interfaccia del foglio LBM

Nel medesimo foglio sarà possibile non solo inserire i dati di INPUT ed ottenere quelli in OUTPUT, ma anche visualizzare costi variabili, fissi e totali ed effettuare un'analisi di sensitività sui parametri ritenuti di maggior interesse per la tecnologia in questione. Interessante sarà poter capire come varia il costo totale di lavorazione per LBM in funzione di:

- Potenza della sorgente laser;
- Portata del gas di assistenza;
- Tempi di set-up della macchina.

6. **Grafici:** Nell'ultimo foglio di lavoro intitolato "Grafici" sarà possibile effettuare un confronto finale tra le quattro tecnologie. In esso sono infatti contenuti grafici

comparativi di costo totale basati nuovamente su un'analisi di sensitività dei parametri ritenuti di maggior interesse. L'importanza dello strumento sviluppato si concretizza quindi nella possibilità di confrontare quantitativamente le differenti tipologie di taglio, capendo come varia il costo totale per ciascuna di esse in funzione di:

- Spessore della lamiera da tagliare;
- Lunghezza del taglio da effettuare;
- Materiale di taglio;
- Numero di componenti da produrre;
- Utilizzo annuo del macchinario in termini di tempi.

#### **4.3.2 FUNZIONI ED ALGORITMI**

Al fine di sviluppare uno strumento di calcolo che permettesse di raggiungere gli scopi prefissati e precedentemente illustrati, si è ritenuto opportuno utilizzare l'implementazione di Visual Basic, inserita all'interno di diverse applicazioni Microsoft, Visual Basic for Applications (VBA), linguaggio di programmazione ad alto livello.

VBA consente una certa interoperatività fra applicazioni grazie all'automazione, partendo, come nel caso del presente elaborato, da dati contenuti in tabelle Excel. I principali oggetti di questo linguaggio, che sono stati utilizzati nel presente caso per la scrittura del codice, sono le subroutine, chiamate anche procedure o macro, le quali eseguono automaticamente un insieme di operazioni nella cartella, foglio o cella selezionate al momento del lancio.

L'utilizzatore, accedendo allo strumento attraverso la prima interfaccia denominata "Dati", inserisce i valori di INPUT non differenziali i quali verranno caricati nei quattro fogli di lavoro relativi alle diverse tecnologie, grazie al pulsante appositamente creato "CARICA DATI". Il codice che permette tale operazione si compone di quattro macro, una per ogni lavorazione e di cui viene fornito un esempio di caricamento (in particolare dal foglio "Dati" al foglio "AWJC", figura 4.7) e di una macro finale che le esegue le precedenti quattro e che viene assegnata al pulsante "CARICA DATI" (figura 4.8).

---

```

Sub copiadati_AWJC()
'dichiario le variabili
    Dim sh1 As Worksheet
    Dim sh2 As Worksheet
    Dim rng As Range

    'metto un riferimento ai due fogli
    With ThisWorkbook
        Set sh1 = .Worksheets("Dati")
        Set sh2 = .Worksheets("AWJC")
    End With

    With sh1
        'metto un riferimento ai Range da copiare
        Set rng = Union(.Range("C7:C9"), .Range("C27:C34"), .Range("C40:C43"), .Range("I40:I43"))
    End With
    With rng
        'copio da un foglio all'altro
        .Areas(1).Copy Destination:=sh2.Range("C202")
        .Areas(2).Copy Destination:=sh2.Range("C222")
        .Areas(3).Copy Destination:=sh2.Range("C235")
        .Areas(4).Copy Destination:=sh2.Range("I235")
    End With

    'Set a Nothing delle variabili oggetto
    Set rng = Nothing
    Set sh2 = Nothing
    Set sh1 = Nothing
End Sub

```

---

Figura 4.8: Macro per il caricamento dei dati su AWJC

---

```

Sub copiatuttti()
    copiadati_AWJC
    copiadati_WEDM
    copiadati_MILLING
    copiadati_LBM
End Sub

```

---

Figura 4.9: Macro per il caricamento di tutti i dati

Per ogni tecnologia è stata poi creata una subroutine di calcolo del parametro fondamentale in caso di lavorazione di taglio, *Material Removal Rate*, la cui valutazione è stata approfonditamente trattata nel presente elaborato al capitolo 2. Il codice che permette di calcolare il rateo di asportazione si compone di due parti:

- Una prima parte risulta essere identica per ogni tecnologia e consiste nella denominazione dei parametri necessari al calcolo e dipendenti dal materiale (rif. Tabella 3.2). Il codice quindi prende per prima cosa in input la scelta sul medesimo, effettuata a questo punto dall'utilizzatore, tramite un messaggio stampato a video (figura 4.10), in cui si chiede di selezionare tramite codice numerico (1/2/3/4/5) uno dei quattro materiali resi disponibili dal software oppure uno nuovo ed il cui significato corrisponde a:
  1. Lega alluminio-magnesio (Peraluman 5754);
  2. Acciaio debolmente legato (34CrNiMo6);

3. Acciaio fortemente legato (X6Cr17);
4. Ottone (CuZn39Pb3)
5. Nuovo materiale, di cui l'utente conosce i parametri richiesti nel foglio "Dati", inserendoli prima di procedere con i calcoli

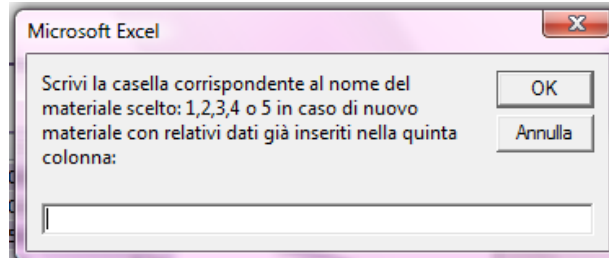


Figura 4.10: Messaggio stampato a video per la scelta del materiale

Dopodiché si dimensionano i parametri di interesse, quali densità del materiale, modulo di Young ed indice di riflettività.

La parte di codice che permette di ottenere il suddetto messaggio stampato a video e che permette di dimensionare ad esempio la densità (parametro d) è la seguente (Figura 4.11):

```
Sub mrr_AWJC()
Sheets("AWJC").Activate
Dim a As Integer, d As Single, E As Single, r As Single, Tf As Single, Tv As Single, Clf As Single, Clv As Single, Css As Single
a = InputBox("Scrivi la casella corrispondente al nome del materiale scelto: 1,2,3,4 o 5 in caso di nuovo materiale con relativi  
'densità
If a = 1 Then
d = cells(207, 2)
ElseIf a = 2 Then
d = cells(207, 3)
ElseIf a = 3 Then
d = cells(207, 4)
ElseIf a = 4 Then
d = cells(207, 5)
Else
d = cells(207, 6)
End If
cells(207, 7) = d
```

Figura 4.11: Macro di dimensionamento parametri e di stampa messaggio

- La seconda parte consiste nell'algoritmo di calcolo del *material removal rate* e differisce quindi da tecnologia a tecnologia. Si riporta l'esempio della parte di codice relativa alla quantificazione di MRR per taglio laser (Figura 4.12):

```
'calcolo il MRR
cells(10, 15) = 10000000000 * cells(7, 3) * (1 - r) / (d * (Clf + Css * (Tf - cells(237, 9))))
End Sub
```

Figura 4.12: Macro di calcolo del rateo di asportazione per taglio laser

Il passo successivo è stata la creazione di una subroutine per ciascun tipo di taglio relativa al calcolo del costo totale. Il codice differisce evidentemente nei quattro casi, ma risulta essere strutturato allo stesso modo:

- Una prima parte di calcolo dei dati di output, opportunamente suddivisi in base alle categorie di appartenenza (pezzo, macchina...) e disposti in modo tale da rispettare le precedenze (essendo il Tempo di lavorazione funzione del Tempo attivo, sarà necessario scrivere prima la parte di codice relativa al calcolo di quest'ultimo)
- Una seconda parte di calcolo dei costi variabili, in riferimento ai modelli di costo illustrati nel capitolo 3 della presente tesi;
- Una terza parte relativa invece ai costi fissi;
- Un' ultima parte di codice dedicata al costo totale, ovvero al completamento del calcolo.

Si riporta, a titolo esemplificativo, l'intera macro di calcolo del costo totale per lavorazione elettroerosiva a filo (Figura 4.13):

```

Sub calcolocosti_WEDM()
Sheets("WEDM").Activate
'calcolo i dati relativi al pezzo
'ampiezza
cells(22, 3) = cells(5, 9) + 2 * cells(4, 9)
'velocità avanzamento
cells(20, 3) = cells(19, 3) / (cells(22, 3) * cells(202, 3))
'tempo attivo
cells(21, 3) = (cells(204, 3) + cells(203, 3) * 2) / (3600 * cells(20, 3))
'tempo lavorazione
cells(18, 3) = cells(21, 3) + cells(225, 3) + cells(226, 3)
'calcolo i dati relativi al filo
'costo cambio
cells(10, 9) = cells(6, 9) * cells(237, 3)
'sezione filo
cells(12, 9) = 3.14 * cells(5, 9) / 4
'calcolo i dati relativi a macchina e generatore
'floor-to-floor time
cells(35, 15) = cells(18, 3) + cells(223, 3) + cells(224, 3)
'potenza generatore
cells(36, 15) = cells(15, 15) * cells(18, 15) * cells(34, 15) / cells(25, 15)
'costo generatore nuovo
cells(37, 15) = cells(21, 15) * cells(36, 15)
'costo manutenzione generatore
cells(38, 15) = cells(24, 15) * cells(37, 15)
'costo manutenzione macchina
cells(39, 15) = cells(22, 15) * cells(23, 15)
'quota ammortamento macchina
Dim j As Integer, sommat As Long
sommat = 0
For j = 1 To cells(229, 3)
sommat = sommat + 1 / (1 + cells(235, 9)) ^ j
Next
cells(40, 15) = cells(22, 15) / (1 + sommat)
'quota ammortamento generatore
Dim i As Integer, somma As Long
somma = 0
For i = 1 To cells(229, 3)
somma = somma + 1 / (1 + cells(235, 9)) ^ i
Next
cells(41, 15) = cells(37, 15) / (1 + somma)
'costo macchina ammortata
cells(42, 15) = cells(22, 15) - cells(40, 15) * cells(31, 15)
'costo generatore ammortato
cells(43, 15) = cells(37, 15) - cells(41, 15) * cells(32, 15)
'costo orario macchina
cells(44, 15) = (cells(42, 15) + cells(39, 15)) / (cells(227, 3) - cells(228, 3) * cells(31, 15))
'costo orario generatore
cells(45, 15) = (cells(43, 15) + cells(38, 15)) / (cells(227, 3) - cells(228, 3) * cells(32, 15))
'calcolo i costi variabili
'costo generatore
cells(45, 7) = cells(45, 15) * cells(35, 15)
'costo macchina
cells(46, 7) = cells(44, 15) * cells(35, 15)
'costo manodopera
cells(47, 7) = cells(237, 3) * (cells(223, 3) + cells(224, 3))
'costo filo
cells(48, 7) = cells(10, 9) + 3.6 * cells(11, 9) * cells(8, 9) * cells(21, 3) / cells(12, 9)
'spese generali
cells(49, 7) = cells(237, 3) * cells(236, 9) * cells(35, 15)
'costo energia macchina
cells(50, 7) = cells(238, 3) / 1000 * (cells(27, 15) * (cells(223, 3) + cells(224, 3)) + cells(28, 15) * (cells(223, 3)
'costo energia generatore
cells(51, 7) = cells(36, 15) * cells(238, 3) * cells(18, 3) / 1000
'totale
cells(52, 7) = cells(238, 9) * (cells(45, 7) + cells(46, 7) + cells(47, 7) + cells(48, 7) + cells(49, 7) + cells(50, 7)
'calcolo i costi fissi
'costi di set up
cells(45, 11) = cells(26, 15) * cells(235, 3)
'costi di programmazione
cells(46, 11) = cells(236, 3) * cells(222, 3)
'totale
cells(47, 11) = cells(45, 11) + cells(46, 11)
'calcolo il costo totale
cells(51, 11) = cells(238, 9) * (cells(45, 7) + cells(46, 7) + cells(47, 7) + cells(48, 7) + cells(49, 7) + cells(50, 7)

End Sub

```

Figura 4.13: Macro per il calcolo del costo totale in caso di WEDM

Al fine semplificare l'uso dello strumento, è stata infine creata una macro per ogni lavorazione che riunisse il calcolo del *material removal rate* ed il calcolo del costo finale (Figura 4.14). Ognuna di esse è stata collegata al pulsante del relativo foglio titolato "CARICA".

```
Sub completafoglio_AWJC()  
mrr_AWJC  
calcolocosti_AWJC  
End Sub
```

Figura 4.14: Macro per il calcolo di tutti i dati nel foglio AWJC

Successivamente, per lo svolgimento dell'analisi di sensitività, sono state costruite svariate macro, una per ogni parametro, sia per quelli specifici di ciascuna lavorazione sia per quelli generali, che si era scelto di esaminare, così come dettagliato al precedente paragrafo 4.3.1. Esse risultano essere dunque tutte differenti, ma aventi comunque la medesima struttura: l'input principale alla subroutine in questione è la macro di calcolo del costo totale, la quale viene richiamata ed al cui interno viene però fatto variare il parametro di interesse secondo valori tabulati nel foglio excel di riferimento. La subroutine restituisce il costo totale per ogni valore che il parametro assume e, per permetterne un agevole funzionamento, viene collegata ad un pulsante avente titolo diverso a seconda del parametro; nel caso di analisi di sensitività per AWJC in cui si vogliano analizzare i costi in funzione della pressione dell'acqua, il pulsante avrà il nome "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE".

Relativamente all'analisi di sensitività, per i soli parametri generali necessari ad un confronto tra le quattro tecnologie, si aggiunge la scrittura di un'ulteriore macro. Questo perché i valori di costo totali restituiti vengono scritti, per ogni lavorazione, nel relativo foglio. Dovendo però essi essere graficati in un unico ultimo foglio di lavoro, "Grafici", è necessaria una macro che vi copi tutti i valori. Se ne riporta l'esempio per il caso MILLING (Figura 4.15):

```
Sub copiacostinnumero_MILLING()  
'dichiaro le variabili  
Dim sh1 As Worksheet  
Dim sh2 As Worksheet  
'metto un riferimento ai due fogli  
With ThisWorkbook  
Set sh1 = .Worksheets("MILLING")  
Set sh2 = .Worksheets("Grafici")  
End With  
With sh1  
'copio da un foglio all'altro  
.Range("B281:B287").Copy Destination:=sh2.Range("D58")  
End With  
'Set a Nothing delle variabili oggetto  
Set sh2 = Nothing  
Set sh1 = Nothing  
End Sub
```

Figura 4.15: Macro di copia dei costi dal foglio MILLING al foglio Grafici



Infine sono state costruite altre sei macro, una per ogni foglio di lavoro, al fine di poter azzerare tutti i valori sia di INPUT che di OUTPUT, per permettere così all'utilizzatore un veloce riutilizzo dello strumento, una volta terminato lo studio di un particolare caso. Nel caso del foglio "Grafici" ad esempio, si ha la seguente subroutine (Figura 4.16):

---

```
Sub azzeragrafici()
  Sheets("Grafici").Activate
  Range(cells(6, 2), cells(15, 2)) = Null
  Range(cells(6, 3), cells(15, 3)) = Null
  Range(cells(6, 4), cells(15, 4)) = Null
  Range(cells(6, 5), cells(15, 5)) = Null
  Range(cells(23, 2), cells(29, 2)) = Null
  Range(cells(23, 3), cells(29, 3)) = Null
  Range(cells(23, 4), cells(29, 4)) = Null
  Range(cells(23, 5), cells(29, 5)) = Null
  Range(cells(41, 2), cells(45, 2)) = Null
  Range(cells(41, 3), cells(45, 3)) = Null
  Range(cells(41, 4), cells(45, 4)) = Null
  Range(cells(41, 5), cells(45, 5)) = Null
  Range(cells(58, 2), cells(64, 2)) = Null
  Range(cells(58, 3), cells(64, 3)) = Null
  Range(cells(58, 4), cells(64, 4)) = Null
  Range(cells(58, 5), cells(64, 5)) = Null
  Range(cells(76, 2), cells(79, 2)) = Null
  Range(cells(76, 3), cells(79, 3)) = Null
  Range(cells(76, 4), cells(79, 4)) = Null
  Range(cells(76, 5), cells(79, 5)) = Null
End Sub
```

Figura 4.16: Macro di azzeramento valori per il foglio Grafici

Con la medesima logica precedentemente esposta, è stato creato un pulsante denominato "AZZERA VALORI" cui è collegata un'unica macro (Figura 4.17) che richiama le altre sei, permettendo così di porre a valor nullo qualsiasi casella numerica dello strumento con un unico clic.

---

```
Sub azzer()
  azzerLBM
  azzerMILLING
  azzerWEDM
  azzerAWJC
  azzerDATI
  azzerGRAFICI
End Sub
```

Figura 4.17: Macro di azzeramento di tutti i valori

## 5. Caso di studio

---

Per qualsiasi implementazione computazionale di un modello mirato alla risoluzione di un problema specifico o al conseguimento di un risultato desiderato, risultano essere assolutamente essenziali e fortemente richiesti la revisione dello strumento e l'analisi di ciò che restituisce, grazie ai calcoli analitici ed algoritmici. Ciò è necessario non solo per valutare la presenza e quindi la conseguente eliminazione di eventuali errori nel codice, ma soprattutto per verificare la conformità dell' algoritmo per un reale scenario di applicazione, valutando in questo modo se il risultato restituito sia matematicamente corretto, e, soprattutto, affidabile e pertinente al contesto per cui è stato utilizzato.

Lo scopo del presente capitolo è dare prova della efficienza e capacità dello strumento di calcolo per la comparazione di tecnologie alternative di taglio e di verificare la robustezza dei risultati al variare di alcuni parametri critici.

### 5.1 DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO

In questo lavoro di tesi, come caso di studio avente lo scopo di testare il funzionamento del foglio di calcolo realizzato ,secondo la specifica delineata nel capitolo 4, viene utilizzato il seguente componente riportato in figura 5.1:



Figura 5.1: Vista del componente da realizzare per il caso di studio

### 5.1.1 CARATTERISTICHE DEL COMPONENTE

Il componente in acciaio X6Cr17 (acciaio fortemente legato) presenta uno spessore pari a 5 mm ed un diametro esterno di 150 mm. Il disegno interno ha una lunghezza totale pari a 688,7 mm. Si ipotizza un numero di componenti da realizzare pari a 600.

La lunghezza totale del taglio risulta quindi essere data da 2 diversi contributi:

1. Lunghezza della circonferenza esterna pari a:  
 $2\pi r = 471,3 \text{ mm}$
2. Lunghezza totale del disegno interno pari a :  
688,7 mm

Per un totale di  $471,3 + 688,7 = 1160 \text{ mm}$ .

Segue una tabella riassuntiva delle caratteristiche del componente (tabella 5.1):

SPESSORE	DIAMETRO ESTERNO	LUNGHEZZA DISEGNO INTERNO	LUNGHEZZA CIRCONFERENZA ESTERNA	LUNGHEZZA TOTALE DI TAGLIO
5 mm	150 mm	688,7 mm	471,3 mm	1160 mm

Tabella 5.1: Caratteristiche geometriche del particolare

### 5.1.2 CARATTERISTICHE DEL TAGLIO

Il taglio si svolgerà in due diverse fasi:

1. Dapprima verrà effettuato il contorno esterno, prevedendo per esso un' extracorsa di 5 mm, all'inizio ed alla fine del taglio in direzione parallela allo stesso;
2. Dopodiché si realizzerà il disegno interno sempre con extracorsa di 5 mm sia all'inizio che alla fine, in direzione perpendicolare a quella di taglio.

### 5.1.3 I DATI INIZIALI DEL PROBLEMA

Come specificato all'interno del paragrafo 4.2.1, i dati iniziali del problema da risolvere saranno di due tipi e verranno di seguito trattati singolarmente:

- Dati generali necessari e non differenziali;
- Dati specifici per ogni lavorazione.

I dati generali e non differenziali sono in parte stati giustificati nei precedenti paragrafi, come lo spessore e la lunghezza di taglio, ed in parte stabiliti a priori e ricavati dall'analisi della letteratura (rif. 3.1.1), come i tempi di programmazione del macchinario, i costi orari di set up ed il tasso di interesse per gli investimenti impiantistici. Per facilità ed immediatezza visiva, possono essere riassunti nella tabella riportata di seguito (Tabella 5.2):

DATO	UNITA' DI MISURA	VALORE INPUT
Spessore di taglio	mm	5
Extracorsa	mm	5
Lunghezza del taglio	mm	1160
Tempi di programmazione	h	5
Tempo di carico pezzo	h/pezzo	0,03
Tempo di scarico pezzo	h/pezzo	0,03
Tempo di avvicinamento	h/pezzo	0,004
Tempo di allontanamento	h/pezzo	0,004
Tempo di vita macchinario	h	24.000
Utilizzo annuo macchinario	h	2.400
Durata investimento	anni	10
Costi orari di set up	€/h	35
Costi orari di programmazione	€/h	30
Costo operatore	€/h	20
Costo elettricità	€/kWh	0,500
Tasso interesse		0,05
Percentuale di spese generali		2
Temperatura ambiente	°C	20
Numero totale di componenti da produrre		600

Tabella 5.2: Dati generali relativi al caso analizzato

Per quanto riguarda i dati specifici di ogni tecnologia, essi sono in parte giustificati di seguito, mentre altri vengono stabiliti in modo arbitrario, comunque coerentemente con la tipologia di lavorazione da effettuare ed unitamente a ciò che è stato ricavato dalla collezione di dati attraverso l'analisi della letteratura, effettuata al capitolo 3.

Per quanto riguarda il taglio AWJC si ipotizza l'uso di un ugello primario di diametro pari a 0,25 mm ed un ugello focalizzatore di diametro pari a 0,76 mm, con acqua alla pressione di 300 MPa ed abrasivo di densità pari a 3750 kg/m<sup>3</sup>.

Nel caso WEDM si può utilizzare un filo di acciaio rivestito in rame ed ottone dal diametro di 0,25 mm, con un gap laterale di 0,03 mm. Duty cycle e frequenza di scarica vengono ipotizzati rispettivamente pari a 0,8 e 10 kHz, mentre la corrente di picco si raggiunge ad 11 A e la tensione di scarica è fissata a 55 V.

Per il taglio MILLING può essere utilizzata una fresa avente 4 denti e di diametro pari a 5 mm, con una velocità di taglio di 100 m/min ed un avanzamento a dente di 0,2 mm.

Il taglio con fascio laser potrebbe invece avvenire con una sorgente di potenza pari ad 1,2 kW che generi un'ampiezza di taglio di 0,5 mm ed avere una portata del gas di assistenza di 2 m<sup>3</sup>/h.

Vengono tutti riassunti in tabelle esplicative (5.3-5.4-5.5-5.6) e suddivisi in dati per AWJC, WEDM, MILLING, LBM essendo parametri specifici della lavorazione.

### AWJC

DATO	UNITA' DI MISURA	VALORE INPUT
Diametro ugello primario	mm	0,25
Durata dell'ugello primario	h	1250
Tempo di cambio ugello	h	0,02
Costo ugello nuovo	€	230
Perdite di carico $\mu$		0,85
Diametro focalizzatore	mm	0,76
Durata focalizzatore	h	80
Tempo cambio focalizzatore	h	0,02
Costo focalizzatore nuovo	€	90
Pressione dell'acqua	MPa	300
Costo unitario dell'acqua	€/m <sup>3</sup>	1,000
Densità dell'abrasivo	kg/m <sup>3</sup>	3.750
Numero di riutilizzi dell'abrasivo		3
Tempo cambio abrasivo	h	0,02
Costo unitario abrasivo	€/kg	0,35
Portata abrasivo	m <sup>3</sup> /h	0,0110
Durata macchina	h	24.000
Durata pompa	h	30.000
Perdite di energia		0,70
Rendimento pompa $\eta$		0,75
Costo unitario di potenza	€/W	5,00
Tempi di set up	h	12
Costo macchina nuova	€	50.000
% manutenzione pompa		0,20
% manutenzione macchina		0,20
Num. macchine per ogni intensificatore		1
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	800
a.s. guide in standby	W	1.500
a.s. guide in lavorazione	W	2.200
a.s. della ventilazione	W	200
Tempo da acquisto macchina	anni	5
Tempo da acquisto pompa	anni	1

Tabella 5.3: Dati specifici per AWJC relativi al caso analizzato

## **WEDM**

<b>DATO</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>	<b>VALORE INPUT</b>
Frazione di potenza assorbita dal pezzo		0,85
Gap laterale	mm	0,030
Diametro del filo	mm	0,250
Tempo cambio filo	h	0,020
Velocità riavvolgimento filo	mm/s	2,8
Costo unitario filo	€/m	0,025
Corrente di picco	A	11
Duty cycle		0,80
Frequenza di scarica	kHz	10
Tensione di scarica	V	55
Durata macchina	h	24.000
Durata generatore	h	20.000
Costo unitario di potenza	€/W	100
Costo macchina nuova	€	70.000
% manutenzione macchina		0,20
% manutenzione generatore		0,20
Rendimento generatore		0,75
Tempi di set up	h	10
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	800
a.s. guide in standby	W	1.500
a.s. guide in lavorazione	W	2.200
a.s. della ventilazione	W	200
Tempo da acquisto macchina	anni	7
Tempo da acquisto generatore	anni	3

Tabella 5.4: Dati specifici per WEDM relativi al caso analizzato

## **MILLING**

<b>DATO</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>	<b>VALORE INPUT</b>
Numero di spigoli taglienti attivi nell'inserto (n <sub>stai</sub> )		3
n <sub>stai</sub> corrispondenti vita stelo porta inserto		300
Avanzamento a dente	mm	0,200
Velocità di taglio	m/min	100
Numero denti fresa		4
Diametro della fresa	mm	5,0
Numero pezzi ottenibili da una lamiera		1
Costo dell'inserto	€	15
Costo dello stelo porta inserto	€	150,000
Tempo di cambio utensile	h	0,02
Durata del tagliente dell'utensile	h	5,00
Costo macchina fresatrice nuova	€	60.000
% manutenzione macchina		0,20
Durata macchina	h	24.000
Tempi di set up	h	15
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	900
a.s. guide in standby	W	1.700
a.s. guide in lavorazione	W	2.400
a.s. della ventilazione	W	150
a.s. evacuazione trucioli	W	300
Rendimento della macchina $\eta$		0,70
Tempo da acquisto macchina	anni	8

Tabella 5.5: Dati specifici per MILLING relativi al caso analizzato

## **LBM**

DATO	UNITA' DI MISURA	VALORE INPUT
Potenza sorgente	W	1.200
Rendimento sorgente		0,50
Costo unitario di potenza	€/W	60
% manutenzione macchina		0,20
%manutenzione sorgente		0,20
Tempi di set up	h	7
Durata sorgente	h	18.000
Durata macchina	h	24.000
Numero macchine per ogni sorgente		1
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	750
a.s. guide in standby	W	1.500
a.s. guide in lavorazione	W	2.400
a.s. della ventilazione	W	150
Tempo da acquisto macchina	anni	5
Tempo da acquisto sorgente	anni	1
Costo macchina nuova	€	50.000
Portata	m3/h	2
Costo unitario	€/m3	25
Ampiezza Taglio	mm	0,500

Tabella 5.6: Dati specifici per LBM relativi al caso analizzato

## **5.2 L' UTILIZZO DELLO STRUMENTO DI CALCOLO**

In questo paragrafo verrà mostrato in che modo è possibile utilizzare il foglio di calcolo e quali sono, infine, le funzioni che svolge.

Per un utilizzo ottimale dello strumento, si ritiene necessario stabilire una procedura formalizzata da seguire, di seguito riportata:

1. Primo *step*: utilizzare lo strumento con i dati iniziali, presentati al par. 5.1.3;
2. Secondo *step*: estrapolare i valori ottimali dei parametri per ciascun processo di taglio;
3. Terzo *step*: confrontare i vari processi, avendo incorporato nei modelli di costo i valori ottimali trovati.

A titolo introduttivo, è necessario precisare che la totalità dello strumento è organizzata come segue:

- Il primo foglio, a cui è stato posto il nome "Dati", contiene i dati generali del problema e viene di seguito mostrato;
- I fogli da 2 a 5 contengono ciascuno i dati specifici di una tecnologia di taglio e sono trattati nei prossimi paragrafi;



- L'ultimo foglio, denominato "Grafici", contiene il confronto economico delle diverse tecnologie e verrà trattato al punto 5.3 relativo all'analisi di sensitività.

### 5.2.1 IL FOGLIO "Dati"

Il foglio iniziale, contenente, come precedentemente spiegato, i dati non differenziali del problema, si presenta come illustrato in figura 5.2.

STRUMENTO DI CALCOLO PER LA COMPARAZIONE DI TECNOLOGIE ALTERNATIVE DI TAGLIO

DATI GENERALI

CARATTERISTICHE DEL TAGLIO

DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Spessore di taglio	mm		1	10
Estremità	mm		1	10
Lunghezza del taglio	mm		100	10000

MATERIALE DA TAGLIARE

Parametro	Materiale	Leghe alluminio-magnesio (Paralus)	Acciaio da laminazione (34CrNi)	Acciaio foramento (S45Cr17)	Ottone (CuZn) 40-60	Neve Motocicli
Densità [kg/m³]		2.650	7.870	7.900	8.400	
Modulo Young [N/mm²]		70.000	210.000	200.000	91.000	
Indice di riflettività		0,73	0,65	0,65	0,90	
Temperatura di fusione [°C]		660	1.530	1.460	930	
Temperatura di vaporizzazione		2.520	2.750	2.630	2.560	
Calore latente di fusione [J/kg]		270.300	240.000	240.000	210.000	
Calore latente di vaporizzazione		3.500.000	3.000.000	3.000.000	2.000.000	
Calore specifico all'istante solido		890	460	460	380	
Calore specifico all'istante liquido		1.870	1.420	1.790	660	
Prezzo specifico di taglio		400,0	2700,0	3100,0	600,0	

TEMPI

DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Tempi di programmazione	h		2	24
Tempi di carica pezzo	h/pezzo		0,03	0,05
Tempi di scarica pezzo	h/pezzo		0,03	0,05
Tempi di avvicinamento	h/pezzo		0,002	0,005
Tempi di allontanamento	h/pezzo		0,002	0,005
Tempi di vita macchina	h		10.000	30.000
Tempi di utilizzo senza macchinari	h		1.600	2.500
Durata investimento	anni		5	10

COSTI

DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Costi materiali di rotazione	h		30	40
Costi materiali di programmazione	h		30	40
Costi materiali di lavorazione	h		15	30
Costi elettricità	h/kWh		0,075	0,500

CARICA DATI

AZZERA VALORI

- 1) Inserire i valori relativi alla colonna INPUT nel foglio Dati
- 2) Cliccare il pulsante "CARICA DATI"
- 3) Aprire il foglio relativo alla lavorazione di interesse:
  - AWJC: taglio idroabrasivo
  - WEDM: taglio per elettroerosione a filo
  - MILLING: taglio per fresatura
  - LBM: taglio laser
- 4) Inserire i valori INPUT nel foglio scelto
- 5) Cliccare il pulsante "CALCOLA"
- 6) Scegliere il materiale da lavorare -> Si ottiene il costo totale
- 7) Cliccare il pulsante relativo al calcolo dei costi in funzione del parametro di interesse -> Si ottiene il relativo grafico
- 8) Dopo aver inserito tutti i dati di INPUT in ogni foglio, nel foglio Grafici cliccare il pulsante relativo al calcolo dei costi in funzione del parametro di interesse -> Si ottiene il relativo

ALTRI DATI

DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Tasso interesse			0,03	0,07
Percentuale di spreco generali			2	3
Temperatura ambiente	°C		15	25
Numero totale di componenti			1	1.000.000

◀ ▶
Dati
AWJC
WEDM
MILLING
LBM
Grafici

Figura 5.2: Primo foglio dello strumento

Il primo passo da compiere è l'inserimento di tutti i valori di INPUT richiesti nelle diverse tabelle. Coerentemente con le ipotesi fatte al precedente paragrafo 5.1, per il caso di studio si inseriscono i seguenti valori (figura 5.3)

CARATTERISTICHE DEL TAGLIO				
DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Spessore di taglio	mm	5	1	10
Extracorsa	mm	5	1	10
Lunghezza del taglio	mm	1160	1	10000

TEMPI				
DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Tempi di programmazione	h	5	2	24
Tempo di carico pezzo	h/pezzo	0,03	0,03	0,05
Tempo di scarico pezzo	h/pezzo	0,03	0,03	0,05
Tempo di avvicinamento	h/pezzo	0,004	0,002	0,005
Tempo di allontanamento	h/pezzo	0,004	0,002	0,005
Tempo di vita macchinario	h	24.000	15.000	30.000
Tempo di utilizzo annuo macchinario	h	2.400	1.600	2.500
Durata investimento	anni	10	5	10

COSTI				
DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Costi orari di set up	€/h	35	30	40
Costi orari di programmazione	€/h	30	30	40
Costo operatore	€/h	20	15	30
Costo elettricità	€/kWh	0,500	0,075	0,500

ALTRI DATI				
DATO INSERITO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Tasso interesse		0,05	0,03	0,07
Percentuale di spese generali		2	2	3
Temperatura ambiente	°C	20	15	25
Numero totale di componenti da produrre		600	1	1.000.000

Figura 5.3: INPUT generali per il caso di studio

E' interessante notare come lo strumento fornisca una verifica immediata e puntuale del valore inserito, la cui relativa casella si colora di verde, se risulta essere interno al range di valori consigliati a destra della stessa, oppure di rosso se eccede la soglia massima o è inferiore alla soglia minima. Ciò vale per tutti i valori di INPUT e di OUTPUT di tutti i fogli dello strumento ma non impedisce comunque al calcolatore di eseguire l'algoritmo. Questo risulta un semplice strumento di controllo di immediato impatto visivo, che evita il protrarsi di eventuali errori di distrazione o scrittura. Se ne riporta di seguito un esempio (figura 5.4).

TEMPI				
DATO INSERITO ▼	U.M. ▼	INPUT ▼	MIN ▼	MAX ▼
Tempi di programmazione	h	0,10	2	24
Tempo di carico pezzo	h/pezzo	0,03	0,03	0,05
Tempo di scarico pezzo	h/pezzo	30	0,03	0,05
Tempo di avvicinamento	h/pezzo	0,004	0,002	0,005
Tempo di allontanamento	h/pezzo	0,004	0,002	0,005
Tempo di vita macchinario	h	7	15.000	30.000
Tempo di utilizzo annuo macchinario	h	2.400	1.600	2.500
Durata investimento	anni	9.000	5	10

Figura 5.4: INPUT errati

Il foglio iniziale, oltre che dai riquadri precedentemente citati, è anche composto da due pulsanti, il cui funzionamento è in seguito brevemente descritto:

- Il pulsante “CARICA DATI” riporta nei fogli successivi tutti i dati inseriti in modo da poter implementare i vari algoritmi. Questa automazione permette di sviluppare ogni foglio singolarmente, eliminando i problemi dovuti alla copia manuale degli elementi necessari e velocizzando notevolmente la totalità dei calcoli che si vogliono eseguire. Una volta premuto il tasto, pertanto, i dati riportati sono resi disponibili in ogni foglio in cui risultano necessari al funzionamento;
- Il pulsante “AZZERA VALORI” porta invece a valor nullo tutte le caselle di INPUT ed OUTPUT di ogni foglio. Quindi, dopo aver utilizzato lo strumento per una particolare analisi, sarà unicamente necessario premere tale pulsante per poter ricominciare ad utilizzare lo strumento al fine di risolvere un nuovo problema.

Dopo aver caricato i dati con l’apposito tasto, si passa all’inserimento dei dati specifici.

### 5.2.2 IL FOGLIO “AWJC”

Il foglio relativo alla tecnologia con getto d’acqua ed abrasivo è strutturato come segue (figura 5.5):

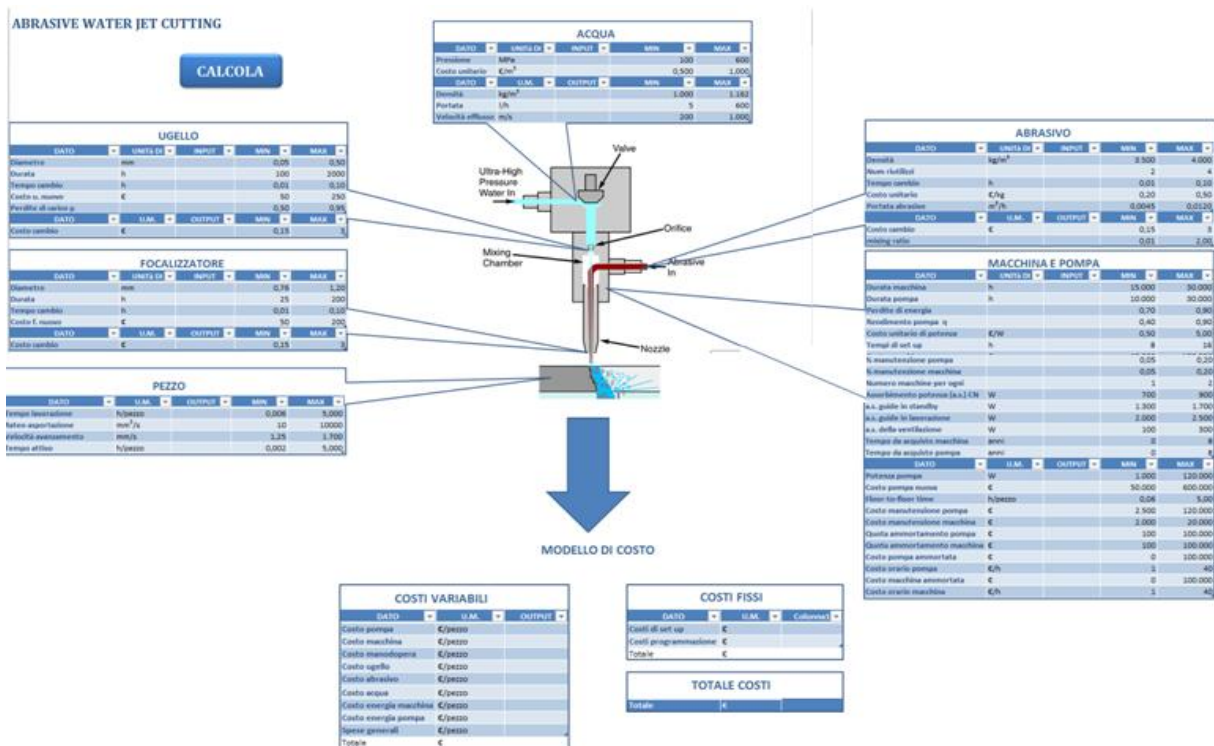


Figura 5.5: Secondo foglio dello strumento

Si inseriscono quindi tutti i valori di INPUT richiesti nelle diverse tabelle. Coerentemente con le ipotesi fatte, per il caso di studio si inseriscono i seguenti valori (figura 5.6):

UGELLO				
DATO	UNITÀ DI	INPUT	MIN	MAX
Diametro	mm	0,25	0,05	0,50
Durata	h	1250	100	2000
Tempo cambio	h	0,02	0,01	0,10
Costo u. nuovo	€	230	50	250
Perdite di carico $\mu$		0,85	0,50	0,95

FOCALIZZATORE				
DATO	UNITÀ DI	INPUT	MIN	MAX
Diametro	mm	0,76	0,76	1,20
Durata	h	80	25	200
Tempo cambio	h	0,02	0,01	0,10
Costo f. nuovo	€	90	50	200

ABRASIVO				
DATO	UNITÀ DI	INPUT	MIN	MAX
Densità	kg/m³	3,750	3,500	4,000
Num riutilizzi		3	2	4
Tempo cambio	h	0,02	0,01	0,10
Costo unitario	€/kg	0,35	0,20	0,50
Portata abrasivo	m³/h	0,0110	0,0045	0,0120

ACQUA				
DATO	UNITÀ DI	INPUT	MIN	MAX
Pressione	MPa	300	100	600
Costo unitario	€/m³	1,000	0,500	1,000

MACCHINA E POMPA				
DATO	UNITÀ DI	INPUT	MIN	MAX
Durata macchina	h	24,000	15,000	30,000
Durata pompa	h	30,000	10,000	30,000
Perdite di energia		0,70	0,70	0,90
Rendimento pompa $\eta$		0,75	0,40	0,90
Costo unitario di potenza	€/W	5,00	0,50	50,00
Tempi di set up	h	12	8	16
Costo macchina nuova	€	50,000	40,000	100,000
% manutenzione pompa		0,20	0,05	0,20
% manutenzione macchina		0,20	0,05	0,20
Numero macchine per ogni		1	1	2
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	800	700	900
a.s. guide in standby	W	1,500	1,300	1,700
a.s. guide in lavorazione	W	2,200	2,000	2,500
a.s. della ventilazione	W	200	100	300
Tempo da acquisto macchina	anni	5	0	10
Tempo da acquisto pompa	anni	1	0	10

Figura 5.6: INPUT di AWJC per il caso di studio

A questo punto, premendo il pulsante “CALCOLA” presente all’inizio del foglio, il programma apre la finestra di dialogo relativa alla scelta del materiale (rif. 4.3.2). Nel caso di studio, essendo il componente costituito da acciaio X6Cr17, materiale corrispondente alla terza colonna della relativa tabella, si digita il numero 3 per poi dare l’ OK (figura 5.7):

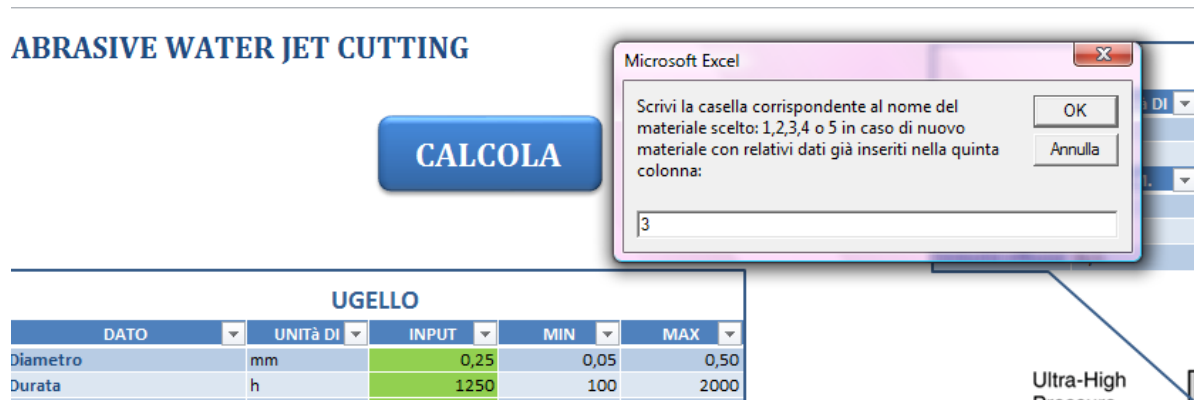


Figura 5.7: Finestra di dialogo per la scelta del materiale

Il software restituisce immediatamente tutti i dati di output ed i costi variabili, fissi e totali, visualizzando ciascuno di essi nella relativa tabella. Nel presente caso si ottengono i seguenti valori (figura 5.8):

UGELLO				
DATO	UNITà DI	INPUT	MIN	MAX
Diametro	mm	0,25	0,05	0,50
Durata	h	1250	100	2000
Tempo cambio	h	0,02	0,01	0,10
Costo u. nuovo	€	230	50	250
Perdite di carico $\mu$		0,85	0,50	0,95
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Costo cambio	€	0,40	0,15	3,

FOCALIZZATORE				
DATO	UNITà DI	INPUT	MIN	MAX
Diametro	mm	0,76	0,76	1,20
Durata	h	80	25	200
Tempo cambio	h	0,02	0,01	0,10
Costo f. nuovo	€	90	50	200
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Costo cambio	€	0,40	0,15	3,

PEZZO				
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Tempo lavorazione	h/pezzo	0,023	0,006	0,200
Rateo asportazione	mm <sup>3</sup> /s	80,257	50	10000
Velocità avanzamento	mm/s	21,12	1,25	1.700
Tempo attivo	h/pezzo	0,015	0,002	0,100

ACQUA				
DATO	UNITÀ DI	INPUT	MIN	MAX
Pressione	MPa	300	100	600
Costo unitario	€/m <sup>3</sup>	1,000	0,500	1,000
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Densità	kg/m <sup>3</sup>	1.099	1.000	1.162
Portata	l/h	111	5	600
Velocità efflusso	m/s	628	200	1.000

ABRASIVO				
DATO	UNITÀ DI	INPUT	MIN	MAX
Densità	kg/m <sup>3</sup>	3.750	3.500	4.000
Num riutilizzi		3	2	4
Tempo cambio	h	0,02	0,01	0,10
Costo unitario	€/kg	0,35	0,20	0,50
Portata abrasivo	m <sup>3</sup> /h	0,0110	0,0045	0,0120
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Costo cambio	€	0,40	0,15	3
mixing ratio		0,10	0,01	2,00

MACCHINA E POMPA				
DATO	UNITÀ DI	INPUT	MIN	MAX
Durata macchina	h	24.000	15.000	30.000
Durata pompa	h	30.000	10.000	30.000
Perdite di energia		0,70	0,70	0,90
Rendimento pompa $\eta$		0,75	0,40	0,90
Costo unitario di potenza	€/W	5,00	0,50	50,00
Tempi di set up	h	12	8	16
Costo macchina nuova	€	50.000	40.000	100.000
% manutenzione pompa		0,20	0,05	0,20
% manutenzione macchina		0,20	0,05	0,20
Numero macchine per ogni		1	1	2
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	800	700	900
a.s. guide in standby	W	1.500	1.300	1.700
a.s. guide in lavorazione	W	2.200	2.000	2.500
a.s. della ventilazione	W	200	100	300
Tempo da acquisto macchina	anni	5	0	10
Tempo da acquisto pompa	anni	1	0	10
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Potenza pompa	W	12.329	1.000	120.000
Costo pompa nuova	€	61.646	50.000	100.000
Floor-to-floor time	h/pezzo	0,08	0,06	0,40
Costo manutenzione pompa	€	12.329	2.500	20.000
Costo manutenzione macchina	€	10.000	2.000	20.000
Quota ammortamento pompa	€	5.604	100	100.000
Quota ammortamento macchina	€	4.545	100	100.000
Costo pompa ammortata	€	56.042	0	100.000
Costo orario pompa	€/h	3	1	20
Costo macchina ammortata	€	27.273	0	100.000
Costo orario macchina	€/h	3	1	20



## MODELLO DI COSTO

COSTI VARIABILI		
DATO	U.M.	OUTPUT
Costo pompa	€/pezzo	0,264
Costo macchina	€/pezzo	0,259
Costo manodopera	€/pezzo	1,200
Costo ugello	€/pezzo	0,820
Costo abrasivo	€/pezzo	0,513
Costo acqua	€/pezzo	0,024
Costo energia macchina	€/pezzo	0,112
Costo energia pompa	€/pezzo	0,095
Spese generali	€/pezzo	3,336
Totale	€	3.973

COSTI FISSI		
DATO	U.M.	Colonna1
Costi di set up	€	420
Costi programmazione	€	150
Totale	€	570

TOTALE COSTI		
Totale	€	4.543

Figura 5.8: OUTPUT di AWJC per il caso di studio

### 5.2.3 IL FOGLIO "WEDM"

Il foglio relativo alla tecnologia di taglio per elettroerosione a filo si presenta come segue (Figura 5.9):

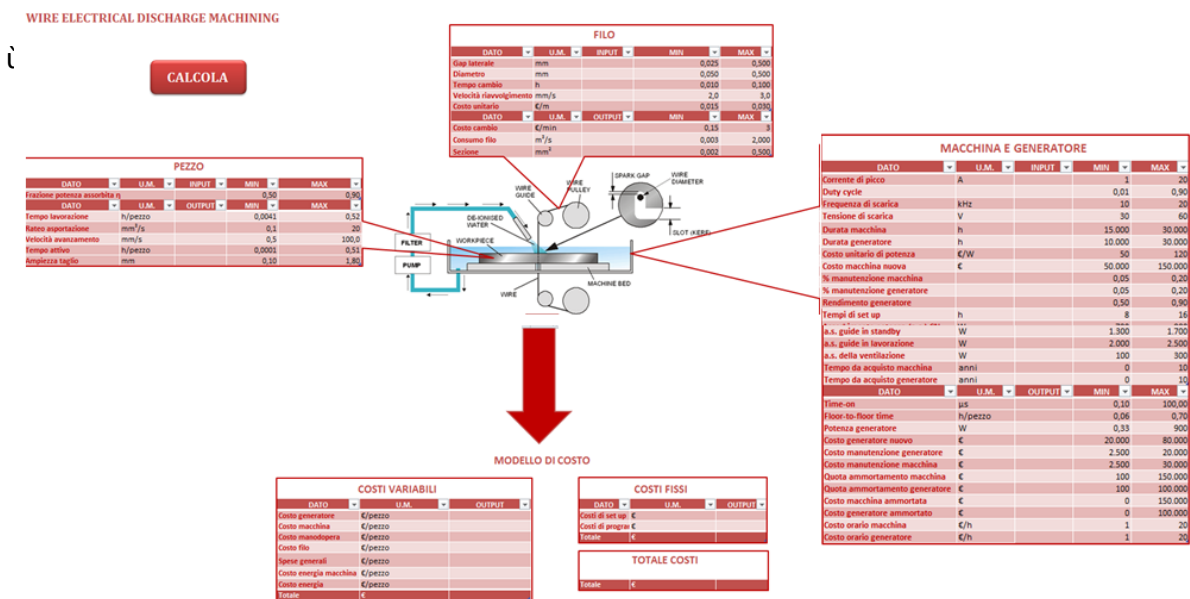


Figura 5.9: Terzo foglio dello strumento

Esattamente come prima, si inseriscono a questo punto tutti i valori di INPUT richiesti nelle diverse tabelle; premendo poi il pulsante "CALCOLA" si sceglie il materiale da tagliare ed il software, per acciaio X6Cr17, restituisce i relativi valori di OUTPUT e di costo. Il tutto viene riportato il figura 5.10:

FILO				
DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Gap laterale	mm	0,030	0,025	0,500
Diametro	mm	0,250	0,050	0,500
Tempo cambio	h	0,020	0,010	0,100
Velocità riavvolgimento	mm/s	2,8	2,0	3,0
Costo unitario	€/m	0,025	0,015	0,030
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Costo cambio	€/min	0,40	0,15	3
Consumo filo	m <sup>3</sup> /s	1,532	0,003	2,000
Sezione	mm <sup>2</sup>	0,196	0,002	0,500

PEZZO				
DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Frazione potenza assorbita $\eta$		0,85	0,50	0,90
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Tempo lavorazione	h/pezzo	0,0660	0,0041	0,52
Rateo asportazione	mm <sup>3</sup> /s	8,684	0,1	20
Velocità avanzamento	mm/s	5,6	0,5	100,0
Tempo attivo	h/pezzo	0,0580	0,0001	0,51
Ampiezza taglio	mm	0,31	0,10	1,80

MACCHINA E GENERATORE				
DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Corrente di picco	A	11	1	20
Duty cycle		0,80	0,01	0,90
Frequenza di scarica	kHz	10	10	20
Tensione di scarica	V	55	30	60
Durata macchina	h	24.000	15.000	30.000
Durata generatore	h	20.000	10.000	30.000
Costo unitario di potenza	€/W	100	50	120
Costo macchina nuova	€	70.000	50.000	150.000
% manutenzione macchina		0,20	0,05	0,20
% manutenzione generatore		0,20	0,05	0,20
Rendimento generatore		0,75	0,50	0,90
Tempi di set up	h	10	8	16
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	800	700	900
a.s. guide in standby	W	1.500	1.300	1.700
a.s. guide in lavorazione	W	2.200	2.000	2.500
a.s. della ventilazione	W	200	100	300
Tempo da acquisto macchina	anni	7	0	10
Tempo da acquisto generatore	anni	3	0	10
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Time-on	μs	8,00	0,10	100,00
Floor-to-floor time	h/pezzo	0,13	0,06	0,70
Potenza generatore	W	645,33	0,33	900
Costo generatore nuovo	€	64.533	20.000	80.000
Costo manutenzione generatore	€	12.907	2.500	20.000
Costo manutenzione macchina	€	14.000	2.500	30.000
Quota ammortamento macchina	€	6.364	100	150.000
Quota ammortamento generatore	€	5.867	100	100.000
Costo macchina ammortata	€	25.455	0	150.000
Costo generatore ammortato	€	46.933	0	100.000
Costo orario macchina	€/h	5	1	20
Costo orario generatore	€/h	4	1	20



## MODELLO DI COSTO

COSTI VARIABILI		
DATO	U.M.	OUTPUT
Costo generatore	€/pezzo	0,449
Costo macchina	€/pezzo	0,691
Costo manodopera	€/pezzo	1,200
Costo filo	€/pezzo	0,441
Spese generali	€/pezzo	5,040
Costo energia macchina	€/pezzo	0,181
Costo energia	€/pezzo	0,021
Totale	€	4.813,405

COSTI FISSI		
DATO	U.M.	OUTPUT
Costi di set up	€	350,0
Costi di program.	€	150,0
Totale	€	500,0

TOTALE COSTI		
Totale	€	5.313,41

Figura 5.10: OUTPUT di WEDM per il caso di studio

### 5.2.4 IL FOGLIO “MILLING”

Il foglio relativo al taglio fresatura viene di seguito rappresentato (Figura 5.11):

**MILLING**

**FRESA**

DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Num spigoli taglienti attil inserto (nsta)		2	2	4
matl corrispondenti alla stelo porta inserto		100	100	300
Avanzamento a dente	mm	0,010	0,010	0,500
Velocità di taglio	m/min	10	10	280
Numero denti fresa		2	2	6
Diametro della fresa	mm	1,0	1,0	20,0
Numero pezzi ottenibili da una lamiera		1	1	3
Costo dell'inserto	€	1	1	20
Costo dello stelo porta inserto	€	50	50	200
Tempo di cambio utensile	h	0,01	0,01	0,10
Durata del tagliente dell'utensile	h	0,25	0,25	6

**PEZZO**

DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Forza di taglio	N	50	50	100.000
Profondità di taglio	W	100	100	100.000
Floor-to-floor time	h/pezzo	0,01	0,01	1
Tempo lavorazione	h/pezzo	0,01	0,01	1
Ratavo asportazione	mm <sup>3</sup> /min	10.000	10.000	1.000.000
Velocità di avanzamento	mm/min	1	1	15.000
Tempo attivo	h/pezzo	0,01	0,01	1,00
Sezione del truciolo	mm <sup>2</sup>	0,010	0,010	5,000

**MODELLO DI COSTO**

**COSTI VARIABILI**

DATO	U.M.	OUTPUT
Costo macchina	€/pezzo	
Costo manodopera	€/pezzo	
Costo utensile	€/pezzo	
Spese generali	€/pezzo	
Costo energia macchina	€/pezzo	
Totale	€	

**COSTI FISSI**

DATO	U.M.	OUTPUT
Costi di set up	€	
Costi di programmazione	€	
Totale	€	

**TOTALE COSTI**

Totale	€	
--------	---	--

Figura 5.11: Quarto foglio dello strumento

Esattamente come nei precedenti casi, si inseriscono dapprima tutti i valori di INPUT richiesti nelle diverse tabelle; premendo poi il pulsante “CALCOLA” si sceglie il materiale da tagliare ed il software, per acciaio X6Cr17, restituisce i relativi valori di OUTPUT e di costo. Il tutto viene riportato il figura 5.12:

FRESA				
DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Num spigoli taglienti attivi inserto (nstai)		3	2	4
nstai corrispondenti vita stelo porta inserto		300	100	300
Avanzamento a dente	mm	0,200	0,010	0,500
Velocità di taglio	m/min	100	10	280
Numero denti fresa		4	2	6
Diametro della fresa	mm	5,0	1,0	20,0
Numero pezzi ottenibili da una lamiera		1	1	2
Costo dell'inserto	€	15	1	20
Costo dello stelo porta inserto	€	150,000	50	200
Tempo di cambio utensile	h	0,02	0,01	0,10
Durata del tagliente dell'utensile	h	5,00	0,25	8
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Costo cambio utensile	€/min	0,40	0,15	3,00
Costo utensile relativo a durata T	€	5,50	0,417	8,67
Num pezzi realizzati con singolo utensile		22	2	1.000.000
Numero denti in presa		2,0	1	3

PEZZO				
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Forza di taglio	N	6.200	50	100.000
Potenza di taglio	W	47.364	100	100.000
Floor-to-floor time	h/pezzo	0,22	0,01	1
Tempo lavorazione	h/pezzo	0,16	0,01	1
Rateo asportazione	mm <sup>3</sup> /min	1,91E+05	10.000	1,00E+06
Velocità di avanzamento	mm/min	127,32	1	15.000
Tempo attivo	h/pezzo	0,15	0,01	1,00
Sezione del truciolo	mm <sup>2</sup>	1	0,010	5,000

FRESATRICE				
DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Costo macchina fresatrice nuova	€	60.000	50.000	100.000
% manutenzione macchina		0,20	0,05	0,20
Durata macchina	h	24.000	15.000	30.000
Tempi di set up	h	15	14	18
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	900	700	900
a.s. guide in standby	W	1.700	1.300	1.700
a.s. guide in lavorazione	W	2.400	2.000	2.500
a.s. della ventilazione	W	150	100	300
a.s. evacuazione trucioli	W	300	100	300
Rendimento della macchina $\eta$		0,70	0,65	0,72
Tempo da acquisto macchina	anni	8	0	10
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Potenza fresatrice	W	7.233	500	8.000
Costo manutenzione macchina	€	12.000	2.500	20.000
Quota ammortamento macchina	€	5.455	100	100.000
Costo macchina ammortata	€	16.364	0	100.000
Costo macchina orario	€/h	6	1	20

## MODELLO DI COSTO

COSTI VARIABILI		
DATO	U.M.	OUTPUT
Costo macchina	€/pezzo	1,771
Costo manodopera	€/pezzo	1,200
Costo utensile	€/pezzo	0,655
Spese generali	€/pezzo	11,988
Costo energia macchina	€/pezzo	1,779
Totale	€	10.435,700

COSTI FISSI		
DATO	U.M.	OUTPUT
Costi di set up	€	525
Costi di programmazione	€	150
Totale	€	675,00

TOTALE COSTI		
Totale	€	11.110,700

Figura 5.12: OUTPUT di MILLING per il caso di studio

### 5.2.5 IL FOGLIO LBM

Il foglio relativo al taglio con fascio laser viene di seguito riportato (Figura 5.13):

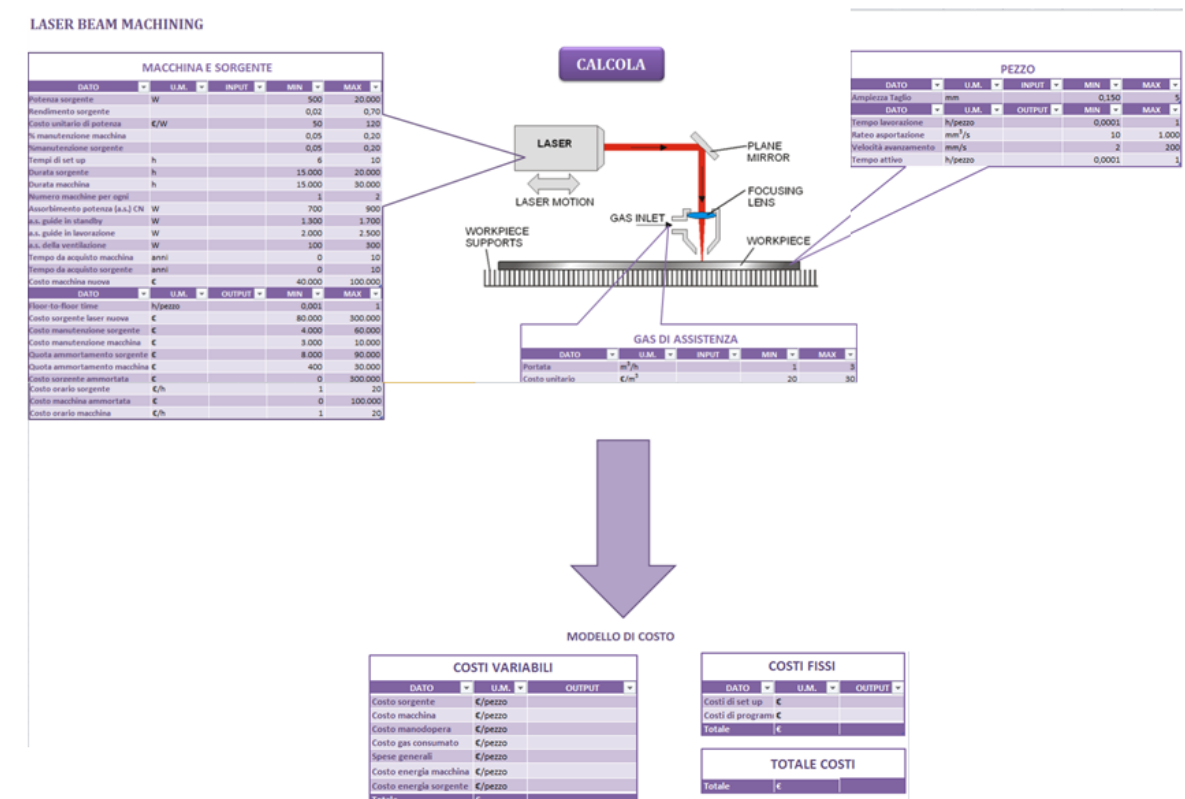


Figura 5.13: Quinto foglio dello strumento

Esattamente come per gli altri fogli, si inseriscono dapprima tutti i valori di INPUT richiesti nelle diverse tabelle; premendo poi il pulsante “CALCOLA” si sceglie il materiale da tagliare ed il software, per acciaio X6Cr17, restituisce i relativi valori di OUTPUT e di costo. Il tutto viene riportato il figura 5.14:

MACCHINA E SORGENTE				
DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Potenza sorgente	W	1.200	500	20.000
Rendimento sorgente		0,50	0,02	0,70
Costo unitario di potenza	€/W	60	50	120
% manutenzione macchina		0,20	0,05	0,20
%manutenzione sorgente		0,20	0,05	0,20
Tempi di set up	h	7	6	10
Durata sorgente	h	18.000	15.000	20.000
Durata macchina	h	24.000	15.000	30.000
Numero macchine per ogni		1	1	2
Assorbimento potenza (a.s.) CN	W	750	700	900
a.s. guide in standby	W	1.500	1.300	1.700
a.s. guide in lavorazione	W	2.400	2.000	2.500
a.s. della ventilazione	W	150	100	300
Tempo da acquisto macchina	anni	5	0	10
Tempo da acquisto sorgente	anni	1	0	10
Costo macchina nuova	€	50.000	40.000	100.000
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Floor-to-floor time	h/pezzo	0,07	0,001	1
Costo sorgente laser nuova	€	107.000	80.000	300.000
Costo manutenzione sorgente	€	21400,00	4.000	60.000
Costo manutenzione macchina	€	10.000	3.000	10.000
Quota ammortamento sorgente	€	9.727	8.000	90.000
Quota ammortamento macchina	€	4545,45	400	30.000
Costo sorgente ammortata	€	58363,64	0	300.000
Costo orario sorgente	€/h	3,69	1	20
Costo macchina ammortata	€	45454,55	0	100.000
Costo orario macchina	€/h	4,62	1	20

PEZZO				
DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Ampiezza Taglio	mm	0,500	0,150	5
DATO	U.M.	OUTPUT	MIN	MAX
Tempo lavorazione	h/pezzo	0,022	0,0001	1
Rateo asportazione	mm <sup>3</sup> /s	58,91463	10	1.000
Velocità avanzamento	mm/s	23,6	2	200
Tempo attivo	h/pezzo	0,014	0,0001	1

GAS DI ASSISTENZA				
DATO	U.M.	INPUT	MIN	MAX
Portata	m <sup>3</sup> /h	2	1	3
Costo unitario	€/m <sup>3</sup>	25	20	30

### MODELLO DI COSTO

COSTI VARIABILI		
DATO	U.M.	OUTPUT
Costo sorgente	€/pezzo	0,302
Costo macchina	€/pezzo	0,378
Costo manodopera	€/pezzo	1,200
Costo gas consumato	€/pezzo	1,307
Spese generali	€/pezzo	3,272
Costo energia macchina	€/pezzo	0,108
Costo energia sorgente	€/pezzo	0,026
<b>Totale</b>	<b>€</b>	<b>3.955,937</b>

COSTI FISSI		
DATO	U.M.	OUTPUT
Costi di set up	€	245
Costi di programmi	€	150
<b>Totale</b>	<b>€</b>	<b>395</b>

TOTALE COSTI		
<b>Totale</b>	<b>€</b>	<b>4.351</b>

Figura 5.14: OUTPUT di LBM per il caso di studio

Possiamo dunque riassumere i risultati ottenuti per il caso in esame con il seguente istogramma di figura 5.15:

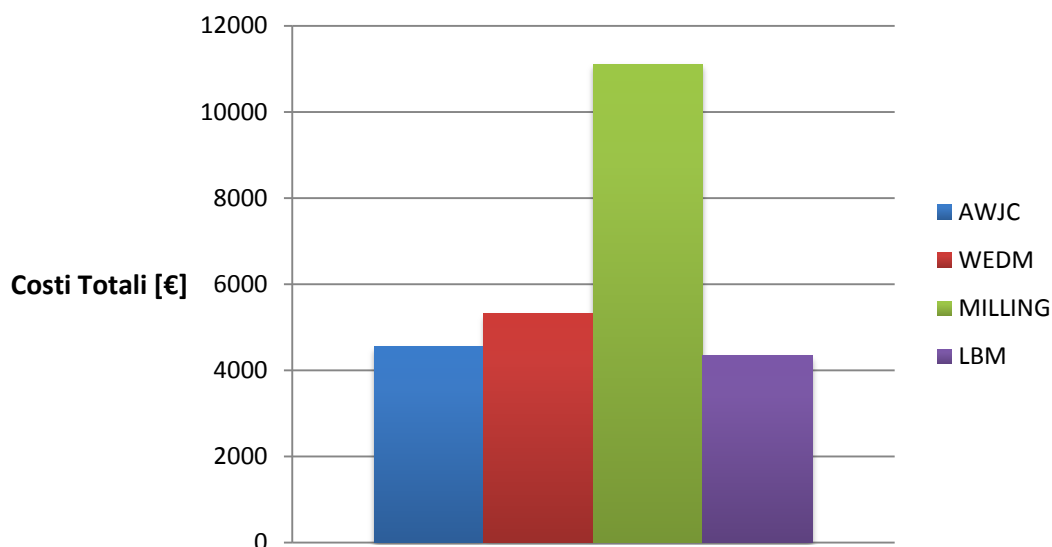


Figura 5.15: Costi totali delle quattro lavorazioni per il caso in esame

E' possibile notare come, per il caso di studio del presente elaborato, il software restituisca come soluzione più conveniente da adottare per l'utilizzatore il taglio con fascio laser della lamiera; seguono il taglio con getto d'acqua e quello per elettroerosione, mentre la fresatura risulta essere quella economicamente più svantaggiosa.

Il risultato ottenuto dipende ovviamente dai dati di input inizialmente scelti per il presente caso; essi potrebbero non essere però i valori ottimali, motivo per cui si prosegue, con il secondo *step*, all'individuazione degli stessi per i parametri di lavorazione di maggior interesse.

### 5.3 ANALISI DI SENSITIVITA'

Una volta valutata la validità dell'algoritmo in termini di affidabilità dei dati in uscita, si ritiene che possa essere importante valutarne anche la robustezza, così da delineare, tra l'altro, in che modo sia possibile intervenire per migliorare i risultati.

I parametri i cui valori sono stati fatti variare, tenendo fissi i rimanenti, per dedurre come i costi potessero dipendere dagli stessi, sono in parte relativi ad ogni specifica lavorazione (secondo *step*) ed in parte facenti invece riferimento ai dati generali (terzo *step*). Per i primi, l'analisi di sensitività è stata effettuata separatamente, nel foglio specifico della lavorazione cui si riferiscono; per i secondi, come già accennato, è stato creato un ultimo foglio di lavoro, intitolato "Grafici". Per ciascuno di essi è stata utilizzata la medesima logica: entro il range stabilito dalle soglie minime e massime, è stato selezionato un certo numero di valori per cui il costo totale è stato interamente ricalcolato; si ottengono in uscita i relativi costi totali ed una rappresentazione grafica della curva in funzione del parametro di interesse. Il layout che si presenta all'utente per ciascuno di essi è costituito dalla tabella riportante i valori del parametro ed i relativi costi, il grafico con la curva di costo ed un pulsante di attivazione della macro. Se ne riporta un esempio in figura 5.16 per il foglio AWJC:

Pressione dell'acqua in l	Costi Tot
100	
150	
200	
250	
300	
350	
400	
450	
500	
550	
600	

Densità abrasivo in kg	Costi Tot
3500	
3600	
3700	
3800	
3900	
4000	

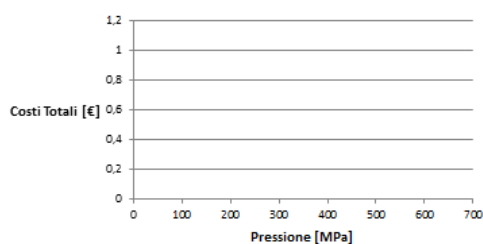
Portata abrasivo in m	Costi Tot
0,0045	
0,006	
0,0075	
0,009	
0,0105	
0,012	

Diametro ugello in mm	Costi Tot
0,05	
0,14	
0,23	
0,32	
0,41	
0,5	

Diametro focalizzatore in mm	Costi Tot
0,76	
0,87	
0,98	
1,09	
1,2	

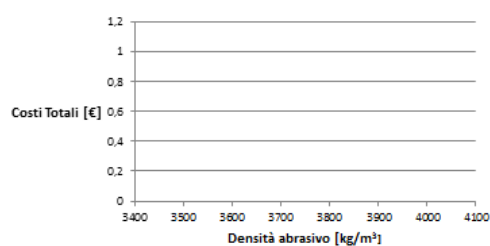
Tempi di set-up in ore	Costi Tot
8	
12	
16	

Costi in funzione della Pressione



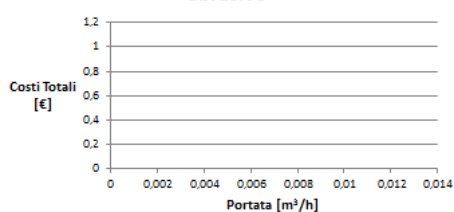
CALCOLA I COSTI IN  
FUNZIONE DELLA  
PRESSIONE

Costi in funzione della Densità di abrasivo



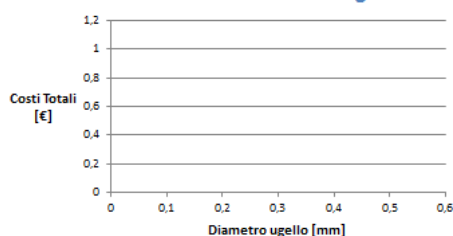
CALCOLA I COSTI IN  
FUNZIONE DELLA  
DENSITA' DI ABRASIVO

Costi in funzione della Portata di  
abrasivo



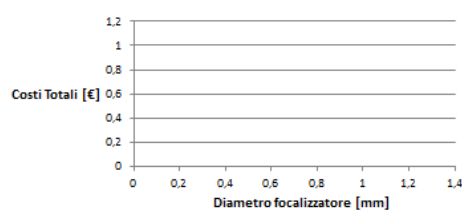
CALCOLA I COSTI IN  
FUNZIONE DELLA  
PORTATA DI ABRASIVO

Costi in funzione del Diametro ugello



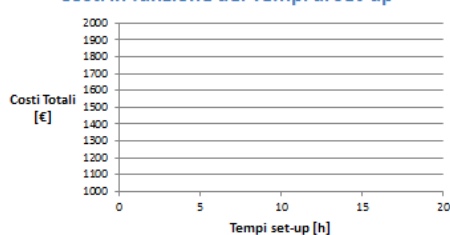
CALCOLA I COSTI IN  
FUNZIONE DEL  
DIAMETRO UGELLO

Costi in funzione del Diametro  
focalizzatore



CALCOLA I COSTI IN  
FUNZIONE DEL  
DIAMETRO

Costi in funzione dei Tempi di set-up



CALCOLA I COSTI IN  
FUNZIONE DEI TEMPI  
DI SET-UP

Figura 5.16: Layout per analisi di sensitività in AWJC

### 5.3.1 IL FOGLIO AWJC

In questo secondo *step*, si prendono in considerazione per ogni lavorazione alcuni dei parametri per i quali lo strumento permette di effettuare l'analisi di sensitività, allo scopo di individuarne i valori ottimali. I parametri oggetto, nel presente lavoro, dell'analisi per AWJC sono:

- Pressione di alimentazione dell'acqua;
- Diametro dell'ugello primario.

**Pressione di alimentazione dell'acqua:** La pressione dell'acqua è stata fatta variare all'interno del range di valori di appartenenza (100 ÷ 600 MPa), con un passo di 50 MPa. Una volta calcolati tutti i valori di output, come spiegato al paragrafo 5.2, è possibile premere l'apposito pulsante "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DELLA PRESSIONE" per ottenere una tabella riassuntiva ed un grafico esplicativo. Per il caso di studio si ottiene quanto segue (figura 5.17):

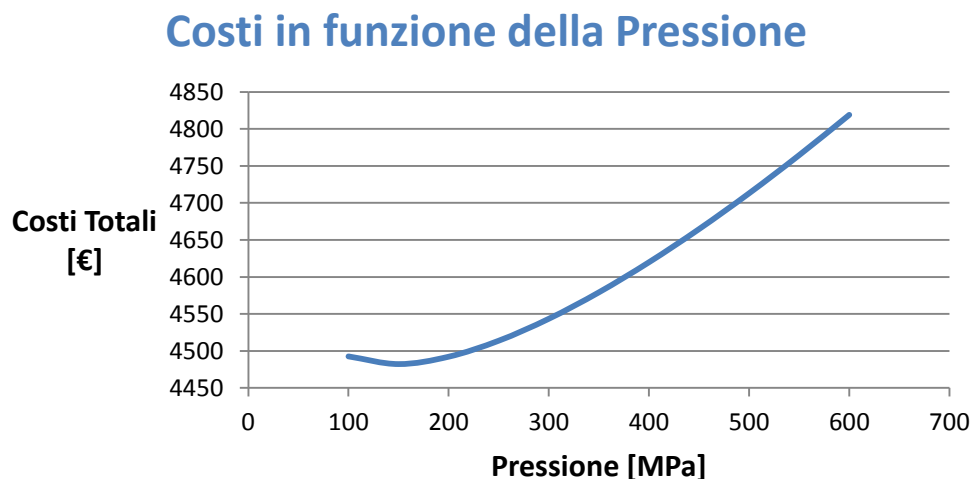


Figura 5.17: Costi AWJC in funzione della pressione per il caso di studio

Si ottiene che i costi totali assumono un andamento prima decrescente poi crescente. Dal punto di vista economico, quindi, per tagliare il materiale avente le caratteristiche specificate, sarebbe opportuno adottare il valore ottimale di pressione di alimentazione dell'acqua pari a 150 MPa, se in corrispondenza di tale punto di minimo la qualità del taglio soddisfa le specifiche richieste.



**Diametro dell'ugello primario:** Il diametro dell'ugello è stato fatto variare all'interno del range di valori di appartenenza (0,05 ÷ 0,5 mm) con passo di 0,05 mm. Una volta calcolati tutti i valori di output, come spiegato al paragrafo 5.2, è possibile premere l'apposito pulsante "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DEL DIAMETRO UGELLO" per ottenere una tabella riassuntiva ed un grafico esplicativo. Per il caso di studio si ottiene quanto segue (figura 5.18):

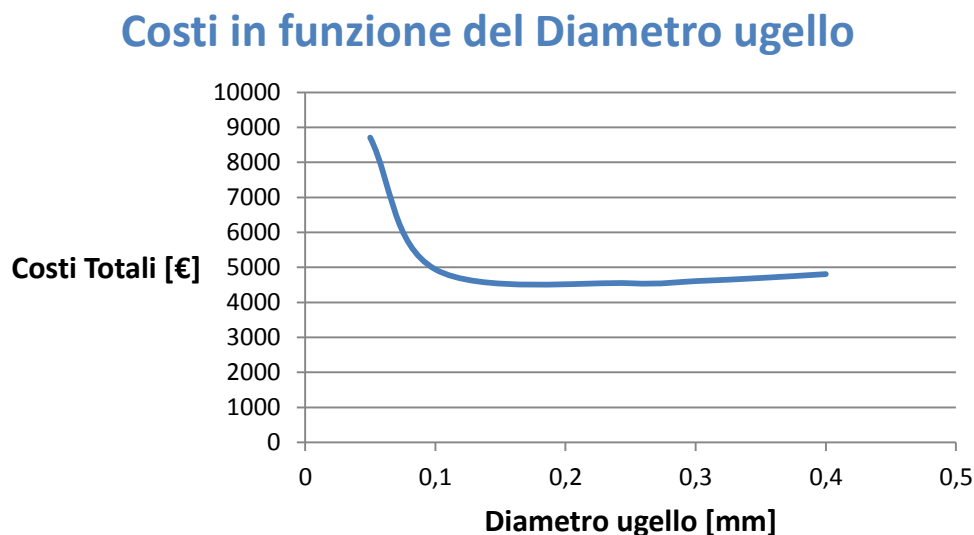


Figura 5.18: Costi AWJC in funzione del diametro ugello per il caso di studio

La curva ha un andamento inizialmente decrescente, raggiunge un valore di minimo attorno a 0,18 mm di diametro per poi crescere lentamente. Anche in questo caso possiamo quindi individuare un valore ottimale da poter adottare.

Avendo trovato come valori ottimali 150 MPa di pressione e 0,18 mm di diametro dell'ugello primario, si ritiene necessario un processo iterativo di ricalcolo dei costi con i suddetti valori, per trovare la combinazione ottimale tra i due parametri.

Partendo dai valori iniziali dell'iterazione 0 e proseguendo, risulta quanto segue (tabella 5.7):

ITERAZIONE	PRESSIONE	DIAMETRO	COSTO TOTALE	Nuovo valore ottimo da grafico
0	300	0,25	4.543	Pressione = 150
1	150	0,25	4.482	Diametro = 0,32
2	300	0,18	4.531 > 4.482 =>	si scarta
3	150	0,32	4.479	Pressione = 100
4	100	0,32	4.454	

Tabella 5.7: Valori ottimali per AWJC

Si raggiunge come minor costo totale 4.454 €; ne consegue una scelta di valori ottimali pari a:

- Pressione di alimentazione dell'acqua = 100 MPa;
- Diametro dell'ugello primario = 0,32 mm.

### 5.3.2 IL FOGLIO WEDM

I parametri selezionati per l'analisi di sensitività, nel presente lavoro, per WEDM sono:

- Corrente di alimentazione;
- Duty Cycle.

**Corrente:** Una volta calcolati tutti i valori di output, è possibile premere l'apposito pulsante "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DELLA CORRENTE" per ottenere una tabella riassuntiva ed un grafico esplicativo. Per il caso di studio si ottiene quanto segue (figura 5.19):

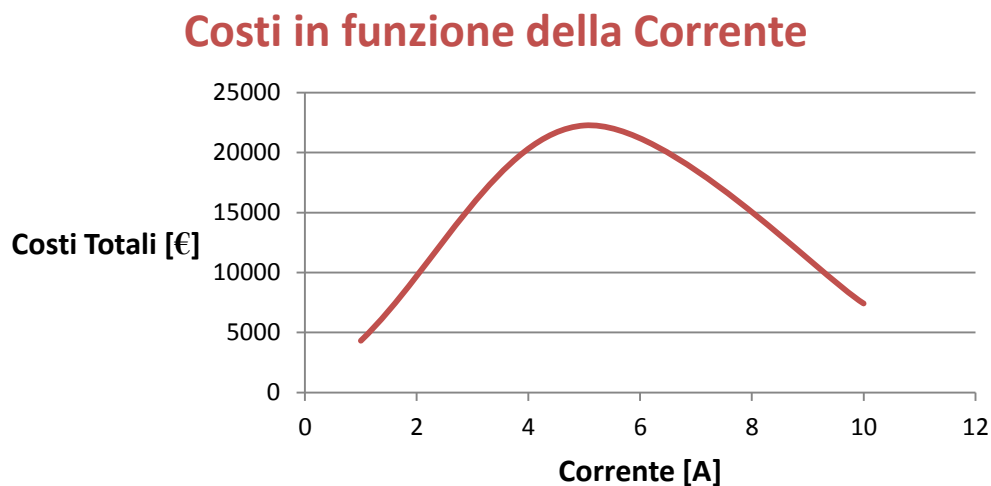


Figura 5.19: Costi WEDM in funzione della corrente per il caso di studio

La curva ha un andamento inizialmente crescente, raggiunge un valore di massimo attorno a 5 A di corrente per poi decrescere. Possiamo quindi cercare di abbassare il valore di corrente sotto i 5 A o alzarlo per valori superiori allo stesso.

**Duty Cycle:** Una volta calcolati tutti i valori di output, è possibile premere l'apposito pulsante "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DEL DUTY CYCLE" per ottenere una tabella riassuntiva ed un grafico esplicativo. Per il caso di studio si ottiene quanto segue (figura 5.20):

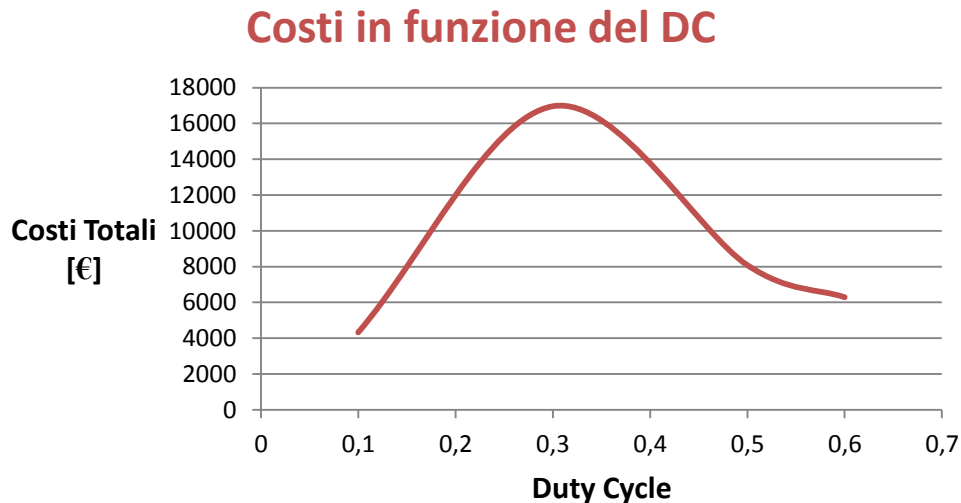


Figura 5.20: Costi WEDM in funzione del duty cycle per il caso di studio

La curva cresce rapidamente raggiunge un valore di massimo attorno a 0,3 per poi decrescere. Possiamo quindi cercare di abbassare il valore di duty cycle sotto lo 0,3 o alzarlo per valori superiori allo stesso.

Esattamente come prima, si ritiene necessario un processo iterativo di ricalcolo dei costi, a partire dai valori iniziali, per trovare la combinazione ottimale tra i due parametri corrente e duty cycle.

Partendo dai valori iniziali dell'iterazione 0 e proseguendo, risulta quanto segue (tabella 5.8):

ITERAZIONE	CORRENTE	DC	COSTO TOTALE	Nuovo valore ottimo da grafico
0	11	0,8	5.313	DC = 0,1
1	11	0,1	4.321	

Tabella 5.8: Valori ottimali per WEDM

Si raggiunge come minor costo totale 4.321; ne consegue una scelta di valori ottimali pari a:

- Corrente di picco = 11 A;
- Duty Cycle = 0,1.

### 5.3.3 IL FOGLIO MILLING

I parametri oggetto, nel presente lavoro, dell'analisi di sensitività per MILLING sono:

- Diametro della fresa;
- Velocità di taglio.

**Diametro della fresa:** Tale parametro è stato fatto variare all'interno del range di valori di appartenenza (1 ÷ 20 mm). Nuovamente, una volta calcolati tutti i valori di output, è possibile premere l'apposito pulsante "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DEL DIAMETRO DELLA FRESA" per ottenere una tabella riassuntiva ed un grafico esplicativo. Per il caso di studio si ottiene quanto segue (figura 5.21):

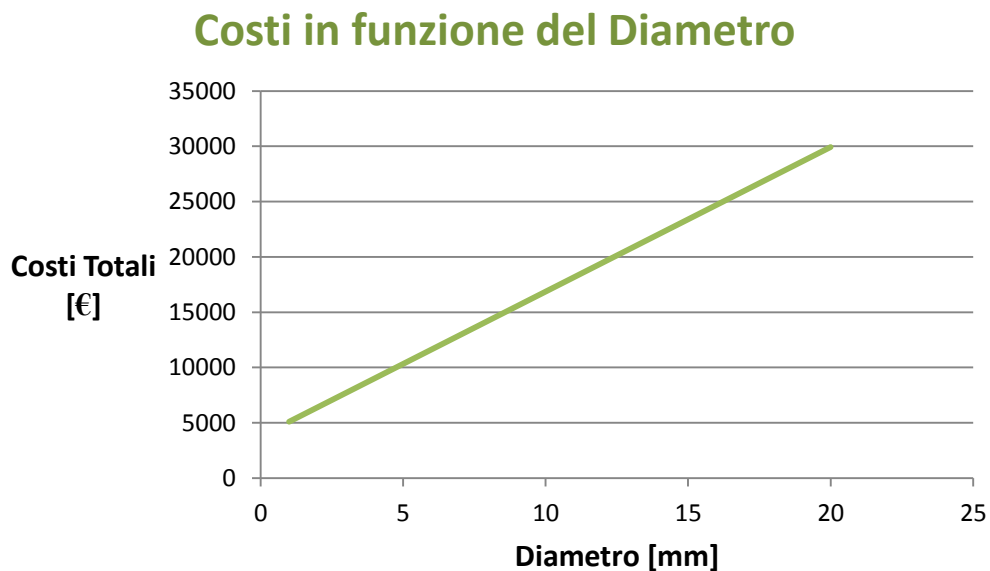


Figura 5.21: Costi MILLING in funzione del diametro della fresa per il caso di studio

I costi totali assumono un andamento crescente in modo lineare. Sarebbe quindi economicamente conveniente scegliere una fresa con il minor diametro possibile.

**Velocità di taglio:** Una volta calcolati tutti i valori di output, è possibile premere l'apposito pulsante "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DELLA VELOCITA' DI TAGLIO" per ottenere una tabella riassuntiva ed un grafico esplicativo. Per il caso di studio si ottiene quanto segue (figura 5.22):

## Costi in funzione della Velocità di taglio

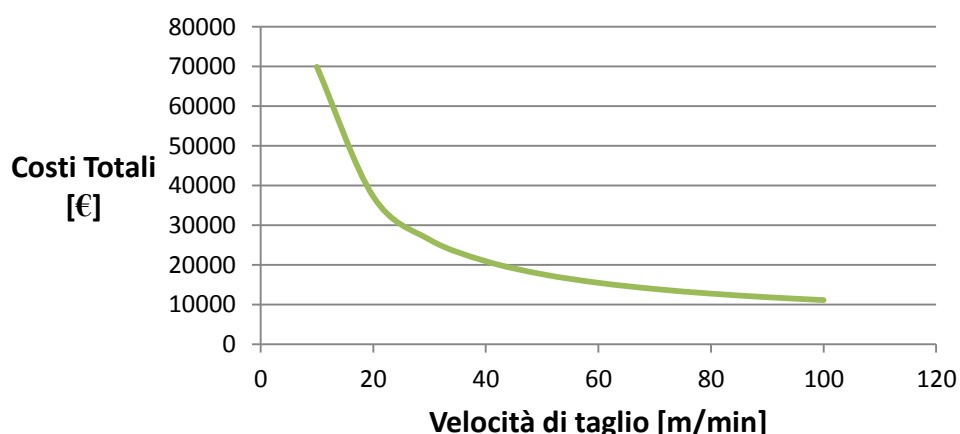


Figura 5.22: Costi MILLING in funzione della velocità di taglio per il caso di studio

La curva decresce rapidamente fino ad un valore della velocità di taglio pari a 20 m/min, per poi mostrare un andamento ancora decrescente ma molto più lento. Dal punto di vista economico, quindi, per tagliare il materiale avente le caratteristiche specificate, sarebbe bene aumentare il più possibile la velocità di taglio, compatibilmente con la qualità di lavorazione richiesta.

Esattamente come prima, si ritiene necessario un processo iterativo di ricalcolo dei costi, a partire dai valori iniziali, per trovare la combinazione ottimale tra i due parametri diametro della fresa e velocità di taglio.

Partendo dai valori iniziali dell'iterazione 0 e proseguendo, risulta quanto segue (tabella 5.9):

ITERAZIONE	VELOCITA'	DIAMETRO	COSTO TOTALE	Nuovo valore ottimo da grafico
0	100	5	11.110	Diametro = 1
1	100	1	5.100	

Tabella 5.9: Valori ottimali per MILLING

Si raggiunge come minor costo totale 5.100; ne consegue una scelta di valori ottimali pari a:

- Velocità di taglio = 100 m/min;
- Diametro della fresa= 1 mm.

### 5.3.4 IL FOGLIO LBM

Il parametro di cui viene effettuata l'analisi di sensitività per LBM per il caso di studio è:

- Potenza della sorgente laser.

**Potenza della sorgente laser:** La potenza della sorgente laser è stata fatta variare all'interno del range di valori di appartenenza (500 ÷ 20.000 W). Premendo l'apposito pulsante "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DELLA POTENZA" si ottiene una tabella riassuntiva ed un grafico esplicativo. Per il caso di studio si ottiene quanto segue (figura 5.23).

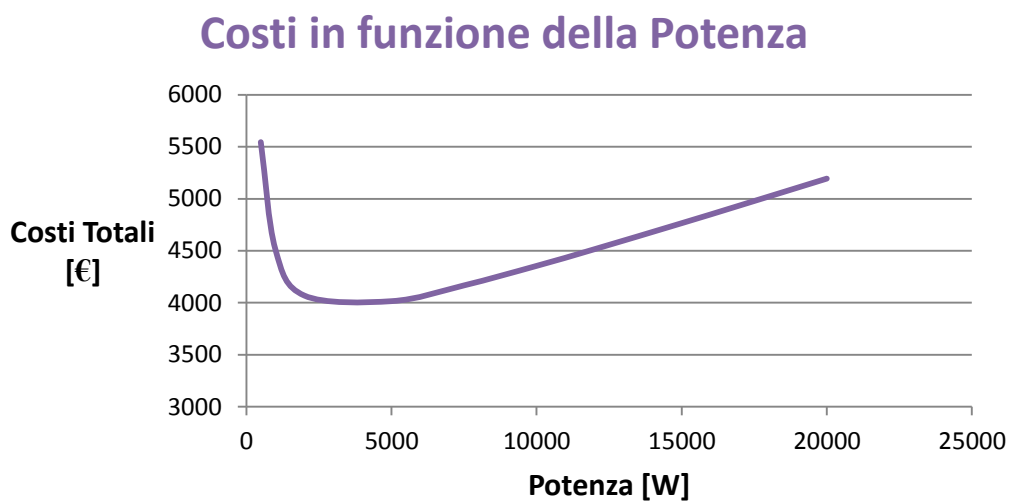


Figura 5.23: Costi LBM in funzione della potenza della sorgente per il caso di studio

La curva ha un andamento inizialmente decrescente, raggiunge un valore di minimo attorno a 4 kW di potenza della sorgente per poi crescere più lentamente. In questo caso possiamo quindi individuare un valore ottimale da poter adottare.

Partendo dai valori iniziali, cioè iterazione 0, e proseguendo, risulta (tabella 5.10):

ITERAZIONE	POTENZA	COSTO TOTALE	Nuovo valore ottimo da grafico
0	1.200	4.351	Potenza = 4.000
1	4.000	3.906	

Tabella 5.10: Valori ottimali per LBM

Si raggiunge come minor costo totale 3.906; ne consegue una scelta di valori ottimali pari a:

- Potenza della sorgente laser = 4000 W.

### 5.3.5 IL FOGLIO GRAFICI

Il layout che si presenta all'utente per l'ultimo foglio di lavoro dello strumento di calcolo, è costituito, per ogni parametro oggetto dell'analisi di sensitività a livello generale, dalla tabella riportante i valori dello stesso ed i relativi costi, il grafico con la curva di costo ed un pulsante di attivazione della macro. Il tutto viene mostrato in figura 5.24.

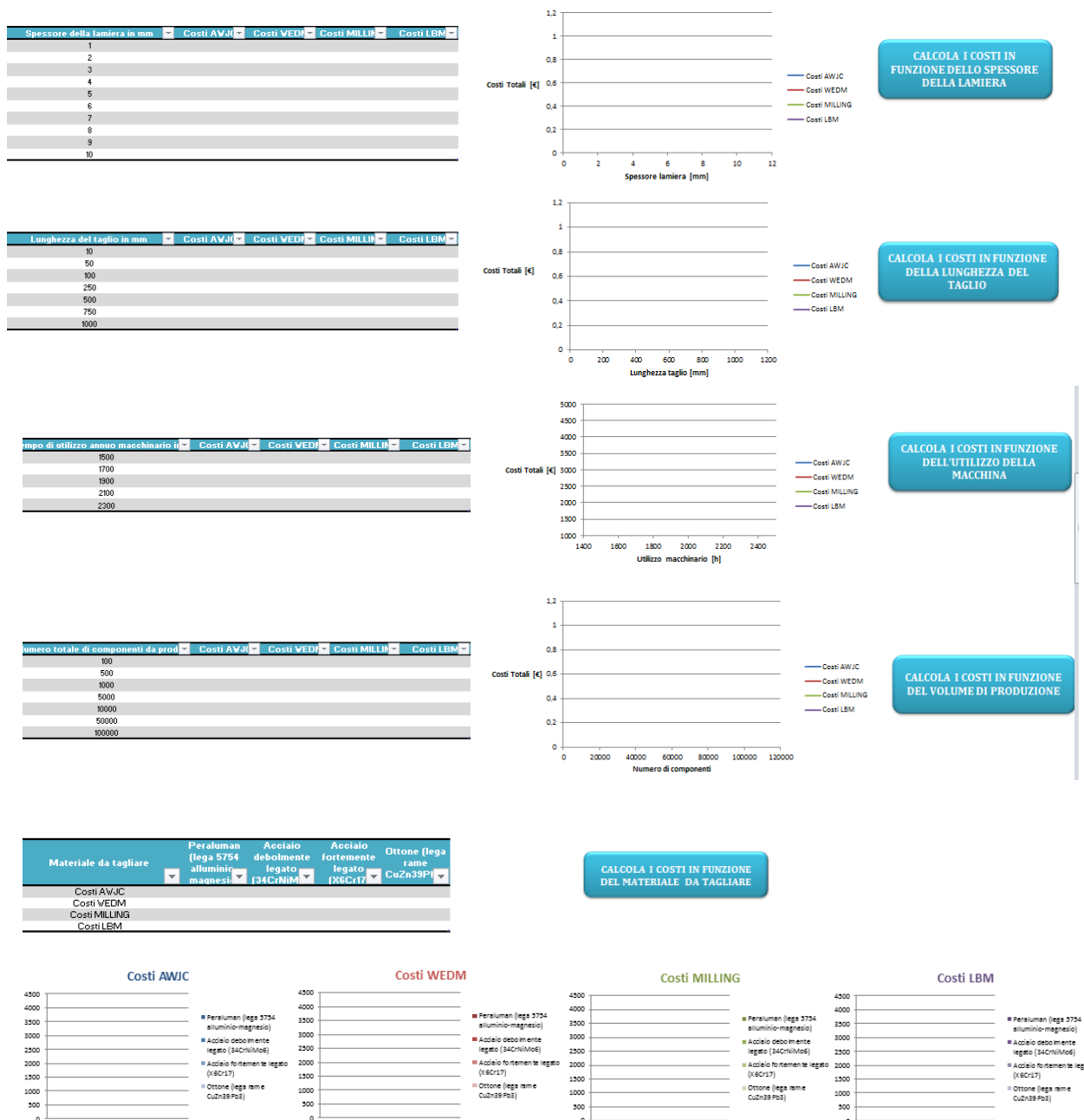


Figura 5.24: Layout del foglio "Grafici"

Il terzo ed ultimo *step* per il presente caso di studio consiste quindi nel confronto tra le diverse tecnologie al variare del volume di produzione, avendo preventivamente sostituito per ciascuna lavorazione i valori ottimali trovati con la precedente analisi di sensitività.

**Volume di produzione:** I costi totali sono stati calcolati per le quattro lavorazioni per valori del numero totale di componenti da realizzare in un range 0 ÷ 600, questo per evidenziare cosa avviene nell'intorno dell'origine, dove l'ordinata della curva è pari ai costi fissi, fino ad arrivare al numero totale di componenti da realizzare per il presente caso di studio. Una volta calcolati tutti gli output in ogni foglio, è possibile premere l'apposito pulsante "CALCOLA I COSTI IN FUNZIONE DEL VOLUME DI PRODUZIONE" per ottenere una tabella riassuntiva ed un grafico esplicativo. Per il caso di studio si ottiene quanto segue (figura 5.25):

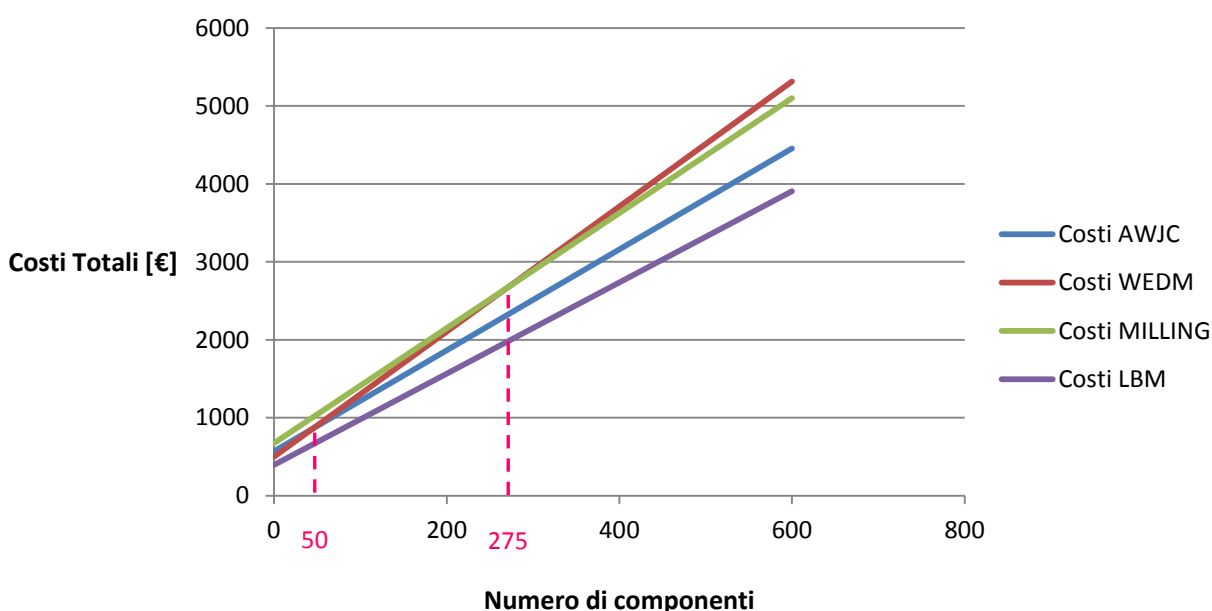


Figura 5.25: Costi totali delle quattro lavorazioni in funzione del numero di componenti da realizzare per il caso di studio

Come facilmente prevedibile, il costo totale aumenta al crescere del volume di produzione. Rispetto all'istogramma di figura 5.15, si nota come per la realizzazione di 600 componenti ipotizzati inizialmente, la tecnologia economicamente meno conveniente non è più la fresatura, bensì il taglio per elettroerosione. Questo cambiamento è dovuto alla precedente analisi di sensitività effettuata sui parametri specifici; tramite essa, sono stati sostituiti, nei modelli di costo, i valori ottimali degli stessi (rif. Par. 5.3), con conseguenti cambiamenti nei costi totali. La tecnologia economicamente più vantaggiosa è ancora il taglio laser, la quale ha la curva di costo più bassa per qualsiasi volume di produzione si debba realizzare. Segue WEDM che, partendo da bassi costi fissi, arriva ad avere la pendenza maggiore tra le quattro curve e risulta maggiormente conveniente delle due rimanenti fino ad un volume produttivo



di 50 pezzi, punto di *breack even point* con la curva AWJC, poco più pendente del LBM. La curva relativa alla lavorazione MILLING, infine, parte dai costi fissi maggiori tra tutte, avendo l'ordinata all'origine più alta, ma per la realizzazione di un numero maggiore di 275 di componenti, altro punto di pareggio, diventa economicamente più conveniente rispetto a WEDM.

## 6. Conclusioni

---

Il continuo aumento di concorrenza e dinamicità che caratterizzano l'attuale mercato globale porta le organizzazioni ad essere sempre più efficienti nel soddisfare le aspettative dei clienti, senza trascurare l'efficacia nel raggiungimento degli obiettivi prefissi. Nell'industria meccanica esistono particolari processi, come il taglio di lamiere, le quali sono un input fondamentale di fabbricazione in svariati campi e settori produttivi, economicamente determinanti per i costi di produzione aziendali.

Il campo di applicazione del presente lavoro è, pertanto, stato quello di sviluppare un primo tentativo per valutare i costi totali di lavorazione nel caso di taglio di lamiere metalliche, ponendo a confronto diverse tecnologie attualmente offerte dalla moderna industria meccanica.

Il primo passo fatto per raggiungere tale obiettivo è stata un'approfondita ricerca, grazie alla letteratura scientifica e ad applicazioni industriali, per delineare lo stato dell'arte relativamente ad approcci già esistenti per il calcolo dei costi totali di ciascuna lavorazione. Le tecnologie di taglio selezionate sono state approfondite per descriverne precisamente principio fisico di taglio, consumo energetico, consumo di materiali e qualità ottenibile, intesa come finitura superficiale, forma del taglio ed alterazioni delle caratteristiche del materiale.

Delineato poi l'attuale livello della scienza e della tecnologia relativamente alla materia oggetto di studio, è stata sviluppata la formulazione matematica del problema, integrando, rispetto a mancanze, i modelli di costo trovati in letteratura ed eliminandone i difetti evidenziati, per giungere così ad un'impostazione finale.

E' stata così possibile l'implementazione software dello strumento di calcolo, attraverso lo sviluppo di interfacce grafiche che ne permettono l'utilizzo e funzioni macro che ne permettono il funzionamento.

Al fine di valutare l'efficienza dell'algoritmo e la correttezza dei risultati restituiti, è stata effettuata una raccolta di dati, poi utilizzati come input per il software.

Per dimostrarne l'efficacia concettuale e l'efficienza di calcolo, lo strumento software è stato utilizzato per un caso di studio reale, ponendo a confronto le diverse tecnologie di taglio nella realizzazione di un particolare componente. Per verificare la robustezza dei risultati al variare di alcuni parametri critici, inoltre, è stata effettuata un'analisi di sensitività degli stessi, selezionati in base all'importanza assunta nel modello di costo.

Indipendentemente da quelli che possono essere i valori numerici risultanti dall'applicazione del caso pratico, è opportuno ricordare che lo scopo di questa tesi consiste nell'elaborare un foglio di calcolo adattabile a qualsiasi caso pratico, che sia un valido supporto per le

organizzazioni e che sia in grado, fondamentalmente, di superare i difetti che sono stati rilevati dallo studio dei casi già presenti in letteratura, esaminati nel capitolo 3. Si ritiene che questo obiettivo sia stato raggiunto, in quanto:

- Nel presente elaborato si considera, per la computazione economica, anche la parte di consumo energetico dovuta alla macchina a controllo numerico nei suoi tre stati di funzionamento, ovvero stato di processo, stato di inattività, stato di ibernazione.
- Sempre per quanto concerne il costo dell'energia, nel taglio per fresatura sono stati suddivisi gli assorbimenti di potenza dei vari componenti costituenti la macchina fresatrice.
- Nell'analisi dei costi, accanto ai variabili, è stata studiata anche la parte fissa dato che risulta essere comunque una componente differenziale nella comparazione di tecniche alternative di lavorazione, sebbene indipendente dal volume produttivo.
- Un altro aspetto che è stato considerato nel presente elaborato a differenza dei modelli preesistenti, è il recupero dell'investimento iniziale, considerato nella stima del costo come ammortamento, per tutti i macchinari a controllo numerico, il sistema di intensificazione di pressione, il generatore di tensione e la sorgente laser.
- La definizione finale dei modelli di costo per ogni lavorazione presenta analogia, uniformità e compattezza rispetto agli altri, ciò che permette di poterne effettuare la comparazione economica, grazie alla completa presenza di informazioni precise, relative alle componenti che risultavano invece assenti nello stato dell'arte.
- Lo strumento creato consente un veloce caricamento automatico dei dati.
- Il foglio di calcolo permette verifiche puntuali sulla correttezza dei dati forniti.
- E' stato ridotto al minimo l'inserimento manuale dei dati di input, creando funzioni di calcolo per gli output, così da massimizzare l'automatizzazione algoritmica.
- Lo strumento genera automaticamente soluzioni ammissibili, visualizzate tramite tabelle e grafici.
- E' possibile inserire manualmente caratteristiche relative ad altri materiali da tagliare che non siano presenti di default nello strumento.

Nonostante i pregi appena elencati, si possono evidenziare anche aspetti critici del modello proposto, così da delineare i temi che potrebbero essere approfonditi nei progetti futuri.

Al momento attuale, lo strumento si limita a calcolare i costi di lavorazione, secondo dei modelli che potrebbero essere perfezionati, senza inoltre effettuare ottimizzazioni dei parametri, che richiederebbero lo studio dell'influenza reciproca tra di essi e l'utilizzo di strumenti di calcolo differenti.

Un'interessante opportunità potrebbe riguardare lo studio dettagliato dei componenti utilizzati per i vari macchinari, in particolare relativamente alla loro probabilità di guasto, in modo da migliorare il calcolo dei ricambi, e quindi la valutazione dei costi di manutenzione.

Si potrebbe poi prevedere l'inserimento di altri tipi di materiali metallici da tagliare tra quelli previsti di default nello strumento, così da ampliare la scelta dell'utente.

Un ulteriore progresso potrebbe riguardare l'implementazione di un database di componenti da inserire nello strumento software, contenente i diversi e possibili componenti che possono essere utilizzati per le varie tecnologie di taglio, così da poter valutare quale sia la migliore configurazione della macchina per soddisfare le esigenze di produzione.

Potrebbe costituire un successivo sviluppo dello strumento la considerazione, ai fini del paragone tra le differenti tecnologie, della qualità di taglio ottenibile, intesa come finitura superficiale, forma del taglio ed alterazioni delle caratteristiche del materiale, aspetti fondamentali e spesso determinanti nella scelta finale.

Si pone ancora in evidenza come il lavoro mostrato rappresenti un primo tentativo nello sviluppo di uno strumento software comparativo delle diverse tecnologie, in quanto il problema, molto complesso ed articolato, non può esaurirsi completamente nel presente elaborato.

# Bibliografia

---

- [Manuali Cremonese, 1982] : "Manuale del perito industriale", Edizioni Cremonese, 1982
- [Zheng, Han, Cheo, Yeo, 1996] : "Quality and Cost Comparisons between Laser and Waterjet Cutting", H.Y.Zheng, Z.Z.Han, Z.D.Chen, W.L.Chen, S.Yeo, 1996
- [Harieh, 2000] : "Cost estimation system for machined parts", B.Harieh, 2000
- [Santochi, 2000] : "Tecnologia Meccanica e Studi di Fabbricazione", M.Santochi, F.Giusti, 2000
- [Verma, Bao, Nagarathanm, 2002] : "Comparison of cost factors in laser processing of materials and traditional metal cutting processes", A.K.Verma, H.P.Bao, K.Nagarathanm, 2002
- "Waterjetting Technology", D.A. Summers, 2003
- "State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)", K.H. Ho, S.T. Newman, S. Rahimifard, R.D. Allen, 2004
- [Seo, Ramulu, Hashish, 2005] : "Cost analysis of abrasive waterjet cutting: thin sheet materials", Y.W.Seo, M.Ramulu, M.Hashish, 2005
- "Visual Basic for Application in Access 2000", A.Lubisco, 2006
- [Uriarte, Herrero, Ivanov, Oosterling, Staemmeler, Tang, Allen, 2006] : "Comparison between microfabrication technologies for metal tooling", L.Uriarte, A.Herrero, A.Ivanov, H.Oosterling, L.Staemmeler, P.T.Tang, D.Allen, 2006
- [Mohammadi, Tehrani, Enanian, Karimi, 2007] : "Statistical analysis of wire electrical discharge turning on material removal rate", A.Mohammadi, A.Tehrani, E.Emanian, D.Karimi, 2007
- [Henning, 2008] : "Economic efficiency and control of high power abrasive waterjet cutting", A.Henning, 2008
- [Holmqvist, e Honsberg, 2008] : "Sensitivity Analysys of abrasive waterjet cutting", G.Holmqvist, U.Honsberg, 2008
- "A procedure to obtain mill cutter and cutting parameters using parameter optimization under constraints and expert rules", L. Rubio M. de la Sen, 2008
- "Simulation as a tool for life cycle cost analysis", Khaled Shahata, Tarek Zayed, 2008
- [Chattopadhyay, 2009] : "Non traditional manufacturing", A.B.Chattopadhyay, 2009
- [Hashish, 2009] : "Trends and Cost Analysis of AWJ Operation at 600 MPa Pressure", M.Hashish, 2009
- "Tecnologia meccanica", G.Bottaini, 2010
- [Quintana, Ciurana, 2011] : "Cost estimation support tool for vertical high speed machines based on product characteristics and productivity requirements", G.Quintana, J.Ciurana, 2011
- "Sistemi Integrati di Produzione", Gino Dini, 2012
- [Hashish, 2012] : "Low cost AWJ cutting", M.Hashish, 2012

- [Monno, 2012] : “Tecnologia Meccanica, le Lavorazioni Non Convenzionali”, M.Monno, B.Previtali, M.Strano, 2012
- “Energy Demand of Machine Tools and Performance Management”, A.Zein, 2012
- [Gontarz, Züst, Weiss, Wegener, 2013] : “Energetic machine tool modeling approach for energy consumption prediction”, A. Gontarz, S.Züst, L. Weiss, K. Wegener, 2013
- [Klocke, Zeis, Klink, Veselovac, 2013] : “Technological and economical comparison of roughing strategies via milling, sinking-EDM, wire-EDM and ECM for titanium- and nickel-based blisks”, F.Klocke, M.Zeis, A.Klink, D.Veselovac, 2013
- “Modeling and Optimization of Wire EDM Process”, K. Kumar, R. Ravikumar, 2013
- [Mastronardi, 2013] : “IDEE ( L’universo e la scienza )”, A.Mastronardi, 2013
- “Finanza e organizzazione aziendale”, L.Pellegrini, 2013
- [Lucefin Group] : “Scheda dati materiali metallici”, Lucefin Group
- [Metallurgia Veneta] : “Scheda dati materiali metallici”, Metallurgia Veneta
- Tesi E.Geria, Lifecycle cost calculation for machine tools in terms of energy consumption, 2013
- Tesi A.Paganella, Sviluppo e Applicazione di uno Strumento Software a Supporto del Bilanciamento di Linee di Montaggio Manuali, 2013
- Cooling technique, <http://www.coolingtechnique.com/proprieta-metalli.html>
- Excel tutorial on the net, <http://www.excel-easy.com/vba/create-a-macro.html>
- Guida all’uso Excel 2000, <http://marchi.ricerca.di.unimi.it/Teaching/docs/ManualeExcel-/index.htm>
- Microsoft Developer Network, Istruzioni Visual Basic, <http://msdn.microsoft.com/it-it/library/2f43da0y.aspx>
- Microsoft most valuable professional, M.Gamberini, <http://www.maurogsc.eu/>
- Special software for plants or machinery, <http://www.engineerplant.it/dtec/proprieta-metalli.php>